



TUGAS AKHIR - TL141584

**ANALISA KEGAGALAN *RISER WALL TUBE*
NOMOR 3 ASTM A210 *GRADE A-1* PADA
BOILER PLTU UNIT 2 PT X**

Eben Haezer
NRP 2712 100 130

Dosen Pembimbing :
Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D
Ir. Rochman Rochiem, M. Sc.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

FAILURE ANALYSIS OF RISER WALL TUBE NO.3 ASTM A210 GRADE A-1 AT BOILER UNIT 2 STEAM POWER GENERATOR PT X

Eben Haezer
NRP 2712 100 130

Advisor Lecturer :

Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., PhD

Ir. Rochman Rochiem, M. Sc.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISA KEGAGALAN RISER WALL TUBE
NOMOR 3 ASTM A210 GRADE A-1 PADA BOILER
PLTU UNIT 2 PT X**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Korosi Dan Analisa Kegagalan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**EBEN HAEZER
NRP. 2712100130**

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Lukman Noerochiem, ST., M.Sc.Eng. Ph.D
..... (Pembimbing
2. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. (Pembimbing 2



**ANALISA KEGAGALAN RISER WALL TUBE
NOMOR 3 ASTM A210 GRADE A-1 PADA BOILER
PLTU UNIT 2 PT X**

Nama : Eben Haezer
NRP : 2712100130
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi, ITS
Dosen Pembimbing : Lukman Noerochiem, S.T, M.Sc.Eng,
Ph.D
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc

ABSTRAK

Kegagalan berupa pecahnya riser wall tube nomor 3 telah terjadi pada PLTU unit 2 PT X pada daerah sekitar pembakaran batubara dan sootblower mengakibatkan siklus boiler harus berhenti. Riser tube pada boiler berfungsi untuk mengalirinya campuran uap dan air dari pipa dinding furnace menuju water-steam separator. Untuk mengetahui penyebab dan mekanisme kegagalan serta mencegah hal yang serupa terjadi lagi, analisa kegagalan pada riser wall tube perlu dilakukan. Uji makroskopik, uji komposisi kimia, uji XRD, uji mikroskop optik, uji SEM, dan uji kekerasan dilakukan untuk mendukung hasil analisa. Hasil pengujian menunjukkan adanya nilai kekerasan tube pada daerah patahan yang naik diiringi dengan bertambah panjangnya butir dengan struktur mikro yang terlihat adalah pearlite dan ferrite. Sementara ditemukan juga penipisan tube dengan ketebalan tidak mencapai ketebalan yang diijinkan serta terbentuknya fasa Fe₃N pada tube. Setelah dilakukan pengujian dan analisa, maka ditemukan faktor penyebab dan mekanisme kegagalan.

Kata kunci: riser wall tube, boiler, uap, penipisan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

***FAILURE ANALYSIS OF RISER WALL TUBE NO. 3
ASTM A210 GRADE A-1 AT BOILER UNIT 2 STEAM
POWER GENERATOR PT X***

Name : Eben Haezer
NRP : 2712100130
Major : Materials & Metallurgical Engineering Dept.
Advisor : Lukman Noerochiem, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc

ABSTRACT

Riser wall tube has been broken by tube depletion. The location of the broken tube is beside sootblower at coal combustion area. It affected the boiler at unit 2 shutted down. Riser tube has an important role on boiler component because its function to flow the mixture of water-steam from furnace tube to water-steam separator. Failure analysis of riser wall tube had to do for analysing the failure cause factor and failure mechanism of the tube and preventing the similar failure happen on another day. Macroscopic testing, optical emission spectroscopy testing, microscope optic testing, SEM testing, and Brinnel hardness testing have been done to support analysis. The result of testing shows the increase of hardness number of tube at broken area of the tube including grain elongation with Ferrite and Pearlite microstructure. Meanwhile there are three spot thickness of the tube lower than the allowable minimum thickness with Fe₃N phase formed. After all testing and analysis complete, the cause factor and mechanism of failure could be found.

Keywords: *riser wall tube, boiler, steam, depletion*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL.....	i
TITLE.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 <i>Boiler</i>	5
2.2 <i>Riser Wall Tube dan Sootblower</i>	7
2.3 <i>ASTM A210 Grade A-1</i>	9
2.4 Konsep Dasar Analisa Kegagalan	13
2.4.1 Faktor kesalahan pemilihan material.....	14
2.4.2 Perawatan komponen yang kurang baik	15
2.4.3 Kesalahan dalam perancangan komponen.....	16
2.4.4 Kondisi kerja yang ekstrem	16
2.5 Prosedur Analisa Kegagalan.....	17
2.6 Kegagalan pada <i>Boiler</i>	17
2.6.1 <i>Fatigue</i>	18
2.6.2 <i>Thermal Fatigue</i>	20
2.6.3 <i>Corrosion Fatigue</i>	21
2.6.4 <i>Overheating</i>	22
a. <i>Short-term overheating</i>	22

b. <i>Long-term overheating</i>	23
2.6.5 <i>Erosion</i>	24
2.6.6 <i>Stress Corrosion Cracking</i>	25
2.6.7 <i>Waterwall Fireside Corrosion</i>	26
2.7 Uji Kekerasan.....	27
2.7.1 Uji Kekerasan Brinell.....	28
2.8 Penelitian Sebelumnya	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	31
3.2 Metode Penelitian.....	31
3.3 Material yang digunakan	32
3.4 Peralatan	33
3.5 Tahapan Penelitian	33
3.5.1 Pengambilan dan Persiapan Spesimen	34
3.5.2 Pengujian Makroskopik	34
3.5.3 Pengujian Komposisi Kimia	35
3.5.4 Pengujian XRD	35
3.5.5 Pengujian SEM	37
3.5.6 Pengujian Mikroskop Optik	37
3.5.7 Pengujian Kekerasan Brinell.....	39
3.6 Rancangan Penelitian	40
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Analisa Data	41
4.1.1 Historis Operasional.....	41
4.1.2 Hasil Pengamatan Makroskopik	41
4.1.3 Hasil Pengujian Komposisi Kimia	45
4.1.4 Hasil Pengujian XRD.....	46
4.1.5 Hasil Pengujian Metalografi	48
4.1.6 Hasil Pengujian SEM.....	51
4.1.7 Hasil Pengujian Kekerasan	52
4.1.8 Ketebalan Minimum Pipa	53
4.2 Pembahasan.....	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	59
5.1 Kesimpulan.....	59

5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA.....	61
LAMPIRAN.....	63

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 <i>Riser wall tube</i> yang mengalami kegagalan.....	2
Gambar 2.1 Sistem sirkulasi uap-air pada boiler batubara.....	5
Gambar 2.2 <i>Riser wall tube</i> posisi belum terpasang	7
Gambar 2.3 <i>Sootblower</i> pada <i>boiler</i>	9
Gambar 2.4 Diagram fasa Fe-Fe ₃ C	10
Gambar 2.5 Struktur mikro <i>Pearlite-Ferrite</i> perbesaran 1000x	11
Gambar 2.6 SEM <i>micrographs carbon steel</i>	11
Gambar 2.7 Model penyelesaian masalah.	13
Gambar 2.8 Permukaan yang mengalami patah akibat <i>fatigue</i>	19
Gambar 2.9 Pipa yang mengalami <i>corrosion fatigue</i>	22
Gambar 2.10 Pipa yang mengalami <i>short-term overhear</i>	23
Gambar 2.11 Pipa yang mengalami <i>long-term overhear</i>	24
Gambar 2.12 Erosi pada <i>tube boiler</i>	25
Gambar 2.13 <i>Stress corrosion cracking</i>	26
Gambar 2.14 <i>Waterwall fireside corrosion</i> pada <i>tube</i>	27
Gambar 2.15 <i>Corrosion fatigue</i> pada <i>bending tube</i>	29
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 3.2 <i>Riser wall tube</i> yang rusak	33
Gambar 3.3 Alat uji makroskopik dan fraktografi	34
Gambar 3.4 Mesin uji spektroskopi PMI-MasterPro	35
Gambar 3.5 Mesin XRD PANalytical.	36
Gambar 3.6 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> <i>Inspect s50</i>	37
Gambar 3.7 Mikroskop optik <i>Olympus BX51M-RF</i>	38
Gambar 3.8 <i>Universal Hardness Tester</i> HBRV 187.5 A	38
Gambar 4.1 Gambar <i>riser wall tube</i> nomor 3 ASTM A210 <i>grade A-1</i>	41

Gambar 4.2 Sisi samping patahan <i>riser wall tube</i> nomor 3 ASTM A210 <i>grade</i> A-1	42
Gambar 4.3 Gambar daerah awal patahan <i>riser wall tube</i> nomor 3 ASTM A210 <i>grade</i> A-1	42
Gambar 4.4 Sisi samping daerah awal patahan <i>riser wall</i> <i>tube</i> nomor 3 ASTM A210 <i>grade</i> A-1	43
Gambar 4.5 Daerah material yang diuji fraktografi	44
Gambar 4.6 Hasil pengamatan fraktografi	44
Gambar 4.7 Grafik hasil uji XRD	46
Gambar 4.8 Spesimen uji metalografi	48
Gambar 4.9 Hasil pengujian metalografi perbesaran 500x	49
Gambar 4.10 Hasil pengujian SEM	51
Gambar 4.11 Hasil indentasi spesimen	52
Gambar 4.12 Grafik hasil pengujian kekerasan	53
Gambar 4.13 Lokasi kebocoran <i>riser wall tube</i>	56

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Komposisi kimia ASTM A210 grade A-1	9
Tabel 2.2 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin .	15
Tabel 2.3 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin	15
Tabel 2.4 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin	16
Tabel 2.5 Mekanisme kegagalan boiler (McIntyre, 2002)	18
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>Riser Wall Tube</i>	32
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian	40
Tabel 4.1 Tabel hasil pengujian komposisi kimia	45
Tabel 4.2 Hasil analisa XRD	47
Tabel 4.3 Hasil perhitungan diameter butir	50
Tabel 4.4 Hasil pengujian kekerasan	52

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan suatu lembaga pembangkitan energi listrik yang proses kerjanya memanfaatkan tenaga uap untuk menghasilkan listrik. PLTU memiliki tiga peralatan utama dalam sistem kerjanya, yaitu *boiler*, turbin, dan *generator*. *Boiler* berfungsi sebagai tungku pemanas yang mengubah air menjadi uap yang selanjutnya digunakan untuk memutar turbin. Kemudian putaran turbin disambungkan dengan *generator* dalam satu poros untuk mengubah energi kinetik dari putaran turbin menjadi energi listrik.

Ketel uap atau *boiler* adalah komponen utama untuk mengubah air menjadi uap sebagai bahan bakar penggerak turbin sehingga bisa membangkitkan tenaga listrik. *Boiler* bekerja pada temperatur tinggi, sehingga sering terjadi degradasi material pada komponen-komponennya. Material yang bekerja pada temperatur tinggi akan mengalami permasalahan korosi, *crack*, penebalan *scale*, *dusting*, *blugging*, dan lain sebagainya. Batubara digunakan PLTU sebagai bahan pembakaran untuk mengubah air menjadi uap. Tempat pembakaran terletak pada *furnace*. Pada dinding *furnace* dialiri oleh pipa yang berisi campuran air dan uap menuju *riser* dan *steam-water separator*. Bila terjadi kerusakan pada salah satu pipa *riser*, maka mengganggu jalannya siklus dari PLTU yang dapat mengakibatkan kerugian ekonomi yang tidak sedikit. Jika hal ini dibiarkan terus terjadi maka uap untuk dijadikan penggerak turbin PLTU mengalir tidak maksimal sehingga mengganggu jalannya siklus PLTU. Akibatnya kerugian ekonomi bagi perusahaan dan kurangnya pasokan listrik yang diberikan kepada masyarakat terjadi.

Berdasarkan hasil inspeksi, *riser wall tube* unit 2 mengalami *rupture* berupa penipisan, pecah, dan kebocoran pada *tube* no. 2 dan 3. Namun penyebab dan mekanisme kegagalan *tube* no. 2



dan 3 berbeda. Lokasi kerusakan *tube* no. 3 terletak pada daerah dekat *sootblower* yang berfungsi untuk membersihkan permukaan *tube* dari abu dan pengotor.



Gambar 1.1 Riser wall tube yang mengalami kegagalan. (1) Sootblower, (2) Tube no. 2, dan (3) Tube no. 3.

Untuk mengetahui penyebab kerusakan dan mekanisme kegagalan yang terjadi serta menentukan *tube* mana yang merupakan penyebab utama kegagalan dan kegagalan sekunder, diperlukan penelitian *riser wall tube* khususnya pada *tube* nomor 3 sehingga diharapkan nantinya dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam melakukan langkah pencegahan dan perawatan agar tidak terjadi kerusakan dengan mekanisme serupa.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang diidentifikasi pada penelitian tugas akhir ini adalah:



1. Apakah penyebab terjadinya kegagalan *riser wall tube* pada *boiler*?
2. Bagaimana mekanisme terjadinya kegagalan *riser wall tube* pada *boiler*?
3. Bagaimana tindakan yang harus dilakukan agar tidak terjadi lagi kegagalan dengan mekanisme yang sama?

1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dan asumsi yang digunakan agar penelitian dapat berjalan dengan baik adalah:

1. Komponen memiliki komposisi material dan sifat mekanik yang homogen pada daerah yang jauh dari patahan.
2. Tidak ada cacat awal fabrikasi pada *tube*.
3. Operasional *boiler* sesuai dengan standard desain.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisa penyebab kegagalan yang terjadi *riser wall tube boiler*.
2. Menganalisa mekanisme kegagalan yang terjadi pada *riser wall tube*.
3. Memberikan rekomendasi yang tepat agar tidak terjadi lagi kegagalan dengan mekanisme yang sama.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian analisa kegagalan ini dilakukan agar diperoleh manfaat bagi beberapa pihak yaitu:

1. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai acuan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dikemudian hari.
2. Bagi pembaca diharapkan dapat memahami dan mengaplikasikan ilmu yang terdapat pada penelitian ini sebagai alat bantu untuk penelitian lain yang terkait dikemudian hari.

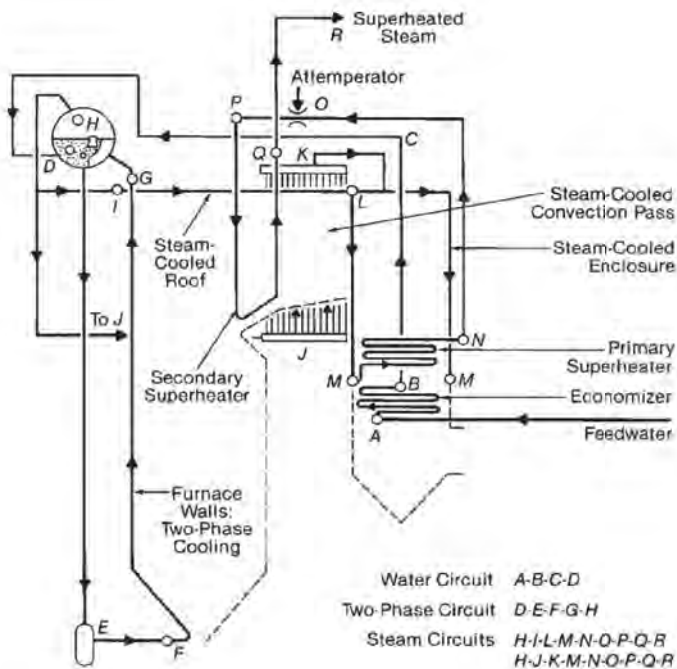


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Boiler*

Generator uap, atau *boiler*, menggunakan panas untuk mengubah air menjadi uap untuk berbagai aplikasi. Fungsi utama *boiler* adalah pembangkit tenaga listrik dan proses pemanasan pada dunia industri. Uap merupakan sumber daya utama karena ketersediaannya yang luas, sifatnya yang menguntungkan dan tidak beracun. Bahan bakar yang digunakan sebagai besar adalah batubara, gas alam, dan minyak. Berikut merupakan cara kerja pada *boiler*.



Gambar 2.1 Sistem sirkulasi uap-air pada *boiler* batubara (*Steam Generation, The Babcock & Wilcox*)



Boiler memiliki 5 komponen utama, yaitu *wall tube*, *economizer*, *steam drum*, *superheater*, dan *reheater*. Gambar 2.1 menjelaskan skema sirkulasi aliran air dan uap pada boiler. Air sebagai bahan utama awalnya masuk ke titik (A) yaitu bagian paling bawah *economizer* lalu mengalir keatas melawan arah dari arah corong uap menuju (B) yaitu bagian atas dari *economizer* yang mungkin pipanya terletak diantara pipa aliran uap. Air kemudian mengalir beberapa pipa yang menghubungkan antara bagian luar *economizer* dengan *steam drum*. Aliran (B-C) mengalir secara vertikal dengan cepat melalui bagian luar *economizer* menuju bagian paling atas pada boiler. Lalu aliran air melewati pipa horizontal dimasukan ke *steam drum* (D) untuk dicampur dengan air keluaran dari *steam-water separator* (H) sebelum dihubungkan kebawah dengan pipa keluaran *steam drum* (D-E).

Air mengalir melalui sirkuit dinding *furnace* (*the furnace water wall circuits*) untuk dipanaskan agar menghasilkan uap. Aliran tadi akan dialirkan menuju bagian bawah *furnace* (D-E) lalu akan mengalir menuju bagian paling bawah dinding panel *furnace* (F). Kemudian air yang panas naik melewati dinding *furnace* menuju (G), tempat dimana energi diserap untuk menghasilkan campuran air dan uap. Campuran air dan uap mengalir melewati dinding *furnace* melewati *riser wall tube* (G-D dan G-H), untuk dipisahkan menuju *steam-water separators* dan *drum*. Air keluaran proses pemisahan akan kembali menuju drum (D), sedangkan campuran uap akan dipisah lagi menuju *secondary steam separators*, dimana uap kering akan dialirkan menuju *reheater* melalui beberapa kali proses keluaran drum (H-I dan H-J).

Uap dari drum tersebut akan melewati beberapa rute menuju *roof tube* (I), lalu menuju panel membran pada *reheater* (J). Kemudian uap mengalir keluar menuju *reheater* kembali (K) untuk dibawa menuju pipa horizontal aliran konveksi (L-M), lalu dikumpulkan pada *economizer* (M). Aliran uap kemudian mengalir menuju *primary superheater* untuk menghasilkan uap



yang super kering. Keluar dari superheater, uap terhubung melalui pipa dengan *spray attemperator* (O). Kemudian uap masuk menuju *secondary superheater* (P-Q). Setelah dihasilkan uap *superheated*, uap keluar melalui pipa menuju keluar *boiler* untuk menjadi bahan bakar penggerak turbin (R).

2.2 *Riser Wall Tube* dan *Sootblower*

Riser wall tube merupakan salah satu bagian yang terpenting pada boiler. Fungsi utama adalah menyalurkan campuran antara air dan uap yang dihasilkan dari ruang bakar utama menuju *steam drum*. Dimensi *riser wall tube* penelitian ini memiliki diameter sekitar 45 mm dengan tebal sekitar 6 mm dengan desain temperatur sebesar 393 °C dan desain tekanan sebesar 19.7 Pa. Pada gambar 2.1 , *riser wall tube* terletak pada G-D dan G-H, dimana pada fase tersebut tube dialiri oleh aliran 2 fasa, yaitu campuran air dan uap (*water-steam*). *Riser wall tube* ini mengalir campuran air dan uap tersebut dari dinding *furnace* menuju *steam-water separators*.



Gambar 2.2 *Riser wall tube* posisi belum terpasang

Pipa *boiler* dan permukaan *boiler* pada daerah sekitar tempat pembakaran sangat mudah untuk menjadi kotor akibat dari debu, uap, deposit terak, abu, dan arang. Hal tersebut bisa menjadi masalah untuk mengurangi efektifitas



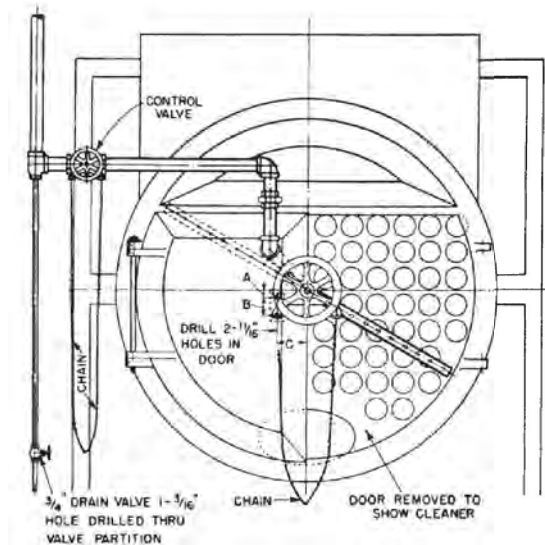
permukaan yang mengalami pembakaran. Oleh karena itu dibutuhkan alat untuk membersihkan permukaan yang kotor, salah satu *sootblower*.

Sootblower adalah mesin yang digunakan untuk membersihkan sisi permukaan boiler dari abu, arang, dan deposit terak. *Sootblower* bekerja dengan *nozzle* untuk melawan abu yang terakumulasi pada permukaan yang mengalami perpindahan panas pada boiler untuk mengurangi dan menghilangkan deposit terak dan abu serta menjaga efektifitas perpindahan panas pada permukaan.

Tipe *sootblower* memiliki banyak variasi tergantung dari lokasinya pada boiler, persyaratan area yang akan dibersihkan, dan kekerasan dari abu yang terakumulasi. *Sootblower* memiliki beberapa komponen terdiri dari:

- Elemen pipa untuk mengangkut medium pembersih
- *Nozzle* untuk mengeluarkan medium pembersih dengan kecepatan tinggi
- Sistem mekanik untuk rotasi pada keluaran medium pembersih
- Sistem pengendali

Medium pembersih *sootblower* terbuat dari uap super kering yang dihasilkan dari *superheater*. *Sootblower* terbuat dari pipa dan paduan khusus tergantung persyaratan bila ditempatkan pada temperatur tinggi. Ukuran, desain, dan lokasi *nozzle sootblower* bervariasi agar cocok untuk membersihkan tube dan peralatan lain yang mengalami perpindahan panas, termasuk *superheater*, *preheater*, dan *economizer*.



Gambar 2.3 Sootblower pada boiler (Woodruff & Lammar, 2004)

2.3 ASTM A210 Grade A-1

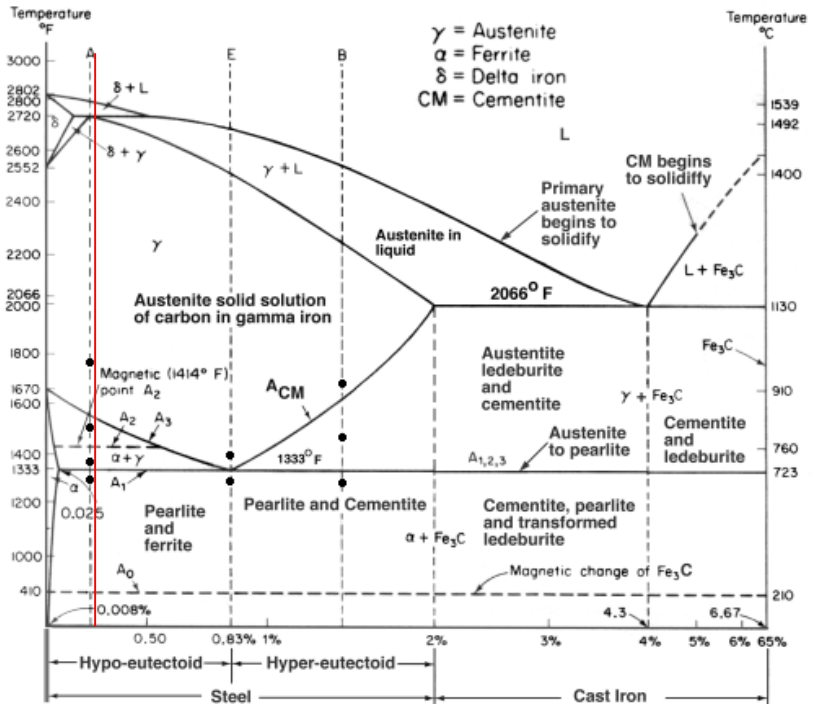
Material ASTM A210 grade A-1 adalah baja karbon yang biasa digunakan untuk *tube boiler*. Nilai kekerasan maksimum menurut standard sebesar 143 HB. Komposisi standard ASTM A210 grade A-1 didefinisikan menurut tabel dibawah.

Tabel 2.1 Komposisi ASTM A210 Grade A-1

Unsur	Komposisi
<i>Carbon</i>	0.27% max
<i>Manganese</i>	0.93% max
<i>Phosphorus</i>	0.035% max
<i>Sulfur</i>	0.035% max
<i>Silicon</i>	0.1 % min

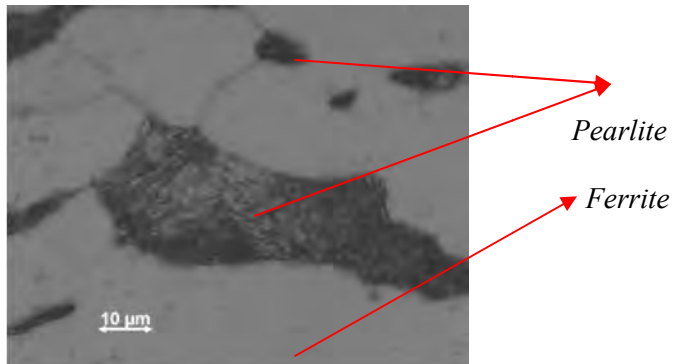


Dengan nilai komposisi maksimum karbon 0.27%, material ASTM A210 bisa dikategorikan sebagai baja karbon rendah (*low carbon steel*). Fasa-fasa yang terbentuk dapat ditunjukkan melalui diagram Fe-Fe₃C.



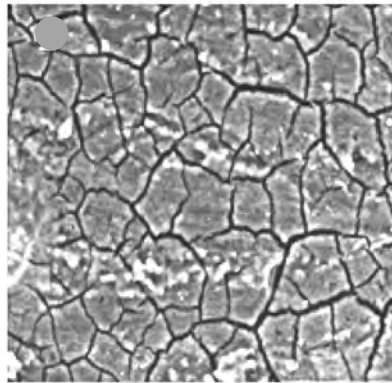
Gambar 2.4 Diagram fasa Fe-Fe₃C (Materials Science and Metallurgy, 4th ed, 1988, Pollack, Prentice-Hall)

Fasa-fasa yang terbentuk pada baja karbon dengan kadar karbon antara 0.2-0.27% pada temperatur kamar adalah *Pearlite* dan *Ferrite* seperti yang ditunjukkan pada garis merah gambar 2.5.



Gambar 2.5 Struktur mikro *Pearlite-Ferrite* perbesaran 1000x (Dorman Long & Co Steel, 2013)

Micrographs low carbon steel dapat dilihat melalui mikroskop elektron salah satunya adalah *scanning electron microscope*. Untuk mendapat *micrograph* permukaan *mild steel* yang baik, sebelum diamati SEM, dilakukan etsa dengan larutan nital.



Gambar 2.6 SEM *micrographs carbon steel* (Kadhum, 2013)



Permasalahan desain pipa baja dapat diatasi dengan acuan menurut hukum Barlow (Griset, 2012). Formula dari hukum Barlow merupakan acuan untuk desain tube boiler menurut ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section I.

Hukum Barlow:

$$S = \frac{P \times d}{2 \times t}$$

Diketahui: S = *allowable stress* material

P = tekanan pada pipa

d = diameter luar pipa

t = tebal pipa

Apabila tube bekerja pada temperatur tinggi, maka formula desain tube boiler mengikuti acuan *ASME BPV Code Section I Part PG 27.2.2*.

$$S = \frac{P \times D}{2 \times t} + 0.005D + e$$

Diketahui: S = *allowable stress* material pada temperatur tertentu

D = diameter luar pipa

P = tekanan yang bekerja pada pipa

t = tebal pipa

e = *thickness factor* untuk *expanded tube ends*

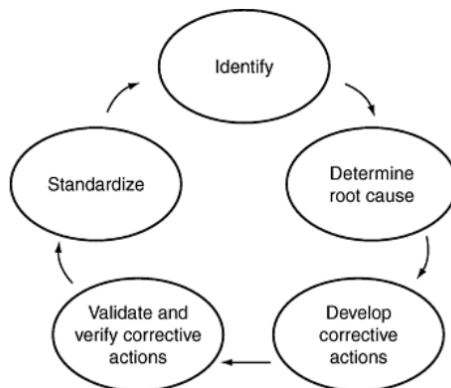
Nilai *allowable stress* diketahui melalui ASME Section II Part D.



2.4 Konsep Dasar Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan adalah kegiatan pemeriksaan/pengujian terhadap suatu komponen yang mengalami kerusakan untuk mencari penyebab terjadi permasalahan yang sifatnya spesifik. Didukung dengan berbagai referensi, pengamatan, dan pengujian laboratorium untuk memperkuat dugaan permasalahan. Kegagalan bisa saja berasal dari manufaktur, perakitan ataupun pengoperasian yang tidak sesuai dengan prosedur, dan tujuan analisa kegagalan untuk mengetahui mekanisme kegagalan. Manfaat yang dihasilkan dari analisa kegagalan dalam jangka pendek adalah perbaikan desain dan proses fabrikasi juga pengoperasian. Untuk jangka panjang bisa dijadikan acuan pengembangan material dan evaluasi untuk memperkirakan kerja suatu material dan memperbaiki sistem perawatan dari material tersebut.

Sebuah model penyelesaian masalah yang padat diadaptasi dari beberapa ahli dan memiliki beberapa aplikasi spesifik ditampilkan dalam gambar 2.7. Sebuah format melingkar secara kontinu dalam gambar dibawah.



Gambar 2.7 Model penyelesaian masalah (ASM Internasional, 2002)



Langkah-langkah utama dalam model proses penyelesaian masalah:

1. Identifikasi: Mendeskripsikan situasi yang ada. Mengidentifikasi kekurangan atau kecacatan dari indikasi-indikasi yang ditemukan. Menentukan dampak kerugian yang terjadi dalam komponen, produk, dan sistem. Menentukan target dan mengumpulkan data untuk mendukung pengukuran dari kecacatan.
2. Menentukan akar permasalahan: Menganalisa masalah untuk mengidentifikasi penyebabnya.
3. Mengembangkan aksi korektif: Mencatat solusi yang mungkin diaplikasikan untuk memperbaiki dan mencegah kegagalan terjadi kembali. Membuat alternative-alternatif dan rencana pengimplementasian.
4. Validasi dan verifikasi aksi korektif: Menguji tindakan dan mengukur efektifitas dari perubahan yang dihasilkan. Validasi peningkatan dan verifikasi masalah yang ada terselesaikan dan meningkatkan kepuasan konsumen.
5. Standarisasi: Memasukan aksi penanggulangan kedalam dokumentasi prosedur standard organisasi serta memonitori perubahan-perubahan yang terjadi untuk memastikan efektifitas.

Didalam pengertian kata, sebuah kegagalan didefinisikan sebagai sebuah kondisi atau kejadian yang tidak diinginkan. Dalam konteks analisa kegagalan dan pencegahan, sebuah kegagalan diartikan sebagai sebuah komponen yang tidak dapat melakukan fungsi sebagaimana mestinya.

Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri (Brooks, 2002), faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan:

2.4.1. Faktor kesalahan pemilihan material

Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan material yang dominannya itu factor kesalahan dalam memilih material. Tabel



2.1 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam kasus kegagalan material.

Tabel 2.2 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin (Brooks, 2002)

Permasalahan	%
Kesalahan pemilihan material	38
Cacat produksi	15
Kesalahan perlakuan panas	15
Kesalahan desain mekanik	11
Kondisi operasi yang berlebihan	8
Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol	6
Pemeriksaan yang kurang baik	5
Material yang tidak jelas	2

2.4.2. Perawatan komponen yang kurang baik

Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.3 menunjukkan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.

Tabel 2.3 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin (Brooks, 2002)

Permasalahan	%
Perawatan yang kurang baik	44
Cacat saat fabrikasi	17
Defisiensi desain	16
Pemakaian yang abnormal	10
Cacat material	7
Penyebab yang tidak jelas	6



2.4.3. Kesalahan dalam perancangan komponen

Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

1. Kegagalan ulet akibat pembebeanan yang melebihi kekuatan material
2. Kegagalan getas akibat beban kejut
3. Kegagalan pada temperature tinggi (pemuluran)
4. Static delayed fracture
5. Proses perancangan yang memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
6. Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat overload
7. Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi perhitungan yang dilakukan

2.4.4. Kondisi kerja yang ekstrem

Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin (Brooks, 2002)

Penyebab Kegagalan	%
Korosi	29
Kelelahan (<i>fatigue</i>)	25
Kegagalan getas (<i>brittle fracture</i>)	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperature tinggi	7
Korosi retak tegang, korosi lelah, penggetasan hydrogen	6
Pemuluran (<i>creep</i>)	3
Abrasi, Erosi	3



2.5 Prosedur Analisa Kegagalan

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dengan menginvestigasi dan menganalisa kegagalan komponen yang terjadi. Adapun tindakan yang perlu dilakukan dalam menginvestigasi komponen yaitu (Nishida, Shinici, 1992):

1. Material yang digunakan

- Data produksi: *melting, rolling, forming, casting, heat treatment*, dan proses *machining*
- Analisa kimia: pengujian X-Ray, komposisi kimia
- Sifat mekanik: *tensile, bending, hardness, impact*, dan *fatigue test*
- Struktur metalurgi: struktur makro dan struktur mikro
- Pengerasan permukaan dan tegangan sisa: *finishing*
- Patah permukaan

2. Desain tegangan dan kondisi perawatan

- Kekuatan dari luar: golongan, besar, pengulangan
- Atmosfir: udara, air, air laut, dan sebagainya
- Lainnya: kondisi perbaikan

3. Uji percobaan

- Uji laboratorium: perhitungan tegangan (kekuatan material), *finite element method* (FEM), kekuatan lelah, dan kekerasan patahan
- Konfirmasi uji lapangan: ukuran tegangan, uji produksi

4. Hasil uji seluruhnya

2.6 Kegagalan pada Boiler

Boiler dan jenis peralatan lain dari pembangkit listrik tenaga uap adalah variasi luas dari kegagalan yang melibatkan satu atau lebih mekanisme. Kebanyakan mekanisme kegagalan yang terjadi akibat korosi, termasuk korosi sumuran dan erosi, proses mekanik lingkungan, seperti *stress cracking corrosion* (SCC) dan kerusakan akibat hidrogen, patah, termasuk patah lelah (*fatigue fracture*), *thermal fatigue fracture*, *stress rupture*, dan distorsi, khususnya distorsi akibat efek *thermal-expansion* dan *creep*.



Kegagalan pembangkit listrik tenaga uap banyak terjadi pada komponen yang bekerja pada tekanan tinggi, seperti tabung, pipa, dan bejana bertekanan (*pressure vessel*) yang bekerja dengan porsi paling besar pada pembangkit listrik. Menurut sumber penelitian dari divisi *boiler* Alstom Power (McIntyre, 2002), mekanisme kegagalan *boiler* karena disebabkan oleh hal-hal dibawah ini.

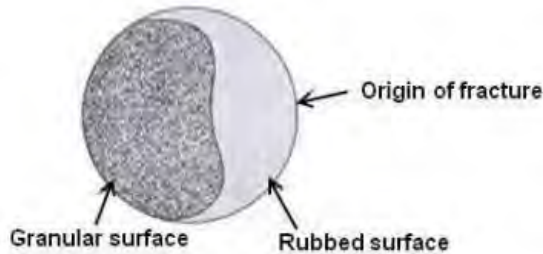
Tabel 2.5 Mekanisme kegagalan boiler (McIntyre, 2002)

<i>Mechanism</i>	<i>%</i>
<i>Erosion</i>	23
<i>Corrosion fatigue</i>	10,5
<i>Thermal fatigue</i>	6
<i>Mechanical fatigue</i>	10,5
<i>SCC</i>	4
<i>Overheating</i>	44
<i>Other</i>	2

2.6.1. *Fatigue*

Kelelahan (*fatigue*) didefinisikan sebagai proses perubahan struktur lokal secara permanen yang terjadi pada material yang mengalami tegangan atau regangan secara dinamik dan fluktuatif pada satu atau beberapa titik tertentu sehingga bisa mencapai retak (*crack*) bahkan patah setelah jumlah tertentu. Dari pandangan desain, pengujian, dan analisa kegagalan, proses *fatigue* ini dibagi kedalam tiga bagian:

- Awal retak (*crack initiation*)
- Perambatan retak (*crack propagation*)
- Patah akhir (*final fracture/sudden fracture*)



Surface of a Fatigue Fracture

Gambar 2.8 Permukaan yang mengalami patah akibat *fatigue* (K. P. Shah, 2013)

Kegagalan fatigue selalu berawal pada awal retak ketika terjadi proses pembentukan nukleus/pengintian pada permukaan suatu komponen pada beberapa titik konsentrasi tegangan. Pengintian retak termasuk permukaan yang tergores (*scratches*), memiliki bekas potong yang tajam (*sharp fillet*), *keyways*, kusut seperti benang (*threads*), penyok (*dent*), dan sebagainya. Kemudian ditambah beban siklik yang dapat memproduksi cacat atau retak mikroskopik sehingga menghasilkan *dislocation slip* yang dapat meningkatkan tegangan dan awal mula retakan.

Daerah pada perambatan retak dapat dikategorikan menjadi dua tipe, *beachmarks* dan *striations*. *Beachmarks* adalah perambatan retak yang dapat dilihat dengan mata terbuka atau makroskopik. Tanda patahan dapat ditemukan pada komponen yang terganggu akibat adanya perambatan retak, misalnya sebuah mesin yang hanya bisa bekerja saat satu *shift* kerja. Setiap berkas *beachmarks* mewakili sebagai satu periode waktu ketika pertumbuhan retak terjadi.

Fatigue striations adalah patahan mikroskopik dan subjeknya harus diobeservasi dengan mikroskop elektron (TEM atau SEM). Setiap goresan (*striation*) berarti adanya jarak yang besar pada retakan selama satu siklus beban. Lebar goresan bertambah tergantung pada kenaikan besar tegangan.



Pada suatu titik bukan berarti retak *beachmarks* dan *striations* terjadi secara terpisah. Banyak kasus yang timbul adanya perambatan retak *beachmarks* dan *striations* terjadi pada satu titik yang sama.

Setelah terjadi perambatan retak, lalu ada satu titik dimana permukaan yang mengalami kegagalan fatigue akan pecah secara tiba-tiba. Kegagalan yang mendadak bisa terjadi pada material ulet ataupun getas. Bukti-bukti menunjukkan deformasi plastis akan terjadi pada material ulet, dan tidak terjadi pada material getas.

2.6.2. Thermal Fatigue

Kelelahan akibat panas (*thermal fatigue*) didefinisikan sebagai patah akibat perubahan temperatur yang curam sehingga menghasilkan tegangan siklus pada struktur material (ASM Handbook, Vol.11, 1986, p11).

Thermal fatigue terjadi ketika metal dikenai beberapa kali siklus pemanasan dan pendinginan cepat sehingga terjadi perbedaan perluasan panas (*thermal expansion*) diantara struktur-struktur material. Kegagalan dapat terjadi dengan kurang dari sepuluh siklus tergantung arah panas kejut (*thermal shock*) yang terlibat. Tegangan biaxial atau triaxial termasuk memiliki pengaruh terhadap permukaan material yang mengalami retak mikro (*microcracks*). Ketika terjadi permulaan retak akan dilanjutkan dengan perambatan setiap siklusnya. Pada pipa uap *boiler* biasanya terjadi kerak didalam (*internal scale*) sehingga menghalangi perpindahan panas dan kemampuan pendinginan. Pada pipa air *boiler*, *thermal fatigue* terjadi ketika adanya pembasahan berkali-kali pada permukaan pipa yang panas sehingga menyebabkan kebocoran pada katup menuju aliran uap panas. Kegagalan pada aliran uap mengakibatkan konsekuensi yang sangat serius.

Retak pada *thermal fatigue* mirip dengan *corrosion fatigue*. *Thermal fatigue* hanya bisa dieliminasi dengan menghapus *thermal*.



2.6.3. *Corrosion Fatigue*

Kelelahan akibat korosi (*corrosion fatigue*) terjadi akibat perubahan tegangan secara fluktuatif yang terjadi pada lingkungan korosif sehingga menyebabkan cepatnya pertumbuhan retak awal dan perambatan retak pada logam (ASM Handbook, Vol 11, 2002).

Corrosion fatigue pada *boiler* sangat berbahaya dan banyak menjadi penyebab kegagalan. *Corrosion fatigue* dipengaruhi oleh desain *boiler* dan pipanya, air yang mengandung larutan kimia korosif, kadar oksigen air *boiler*, dan operasi *boiler* itu sendiri. Syarat terjadinya *corrosion fatigue* adalah interaksi siklus beban yang berulang, lingkungan korosif, dan tegangan sisa yang tinggi. Beberapa kegagalan yang dihasilkan dapat mengakhiri masa pakai material.

Kegagalan jenis ini diawali pada permukaan material yang memiliki tegangan tinggi, seperti *weld undercut*, korosi sumuran, atau cacat lain yang berhubungan pada lasan sehingga menyebabkan tegangan tinggi. Fase awal adalah retak pada lapisan yang terlindungi akibat beban siklik, sehingga menyebabkan serangan kepada logam yang tidak terlindungi oleh media korosif dan terbentuknya retak mikro. Logam yang diserang pada akar retakan akan teroksidasi lalu mengalami retak pada siklus berikutnya sehingga disebut perambatan retak. Bentuk retakan tajam dan pola retakannya transgranular.



Gambar 2.9 Pipa yang mengalami *corrosion fatigue* (Babcock & Wilcox Power Generation Group, 2013)

2.6.4. Overheating

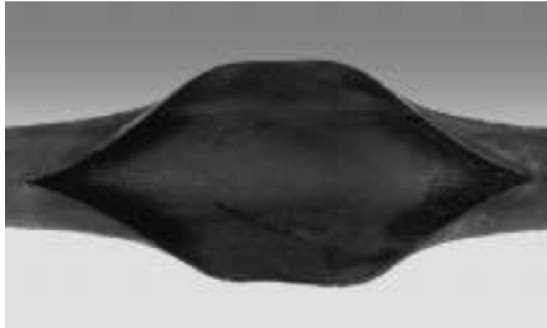
Kelebihan panas (*overheating*) adalah penyebab mekanisme kegagalan dengan jumlah terbanyak. Pada pipa *boiler*, *overheating* biasa terjadi pada daerah *furnace*, dinding, atap, *superheater*, atau area penyimpanan air utama (*drum*). Kegagalan pipa biasanya dibagi dua, yaitu:

a. Short-term overheating

Overheating jangka pendek biasa terjadi pada saat sistem *boiler* baru beroperasi (*start up*) dan terjadi ketika *temperature tube* naik di atas batas desain dalam jangka waktu yang singkat sehingga menimbulkan pecah pada pipa logam yang ulet. Kebanyakan kasus-kasus yang pernah terjadi, *temperature logam* setidaknya 850°F (454°C) dan sering melebihi 1350°F (730°C). Tergantung pada *temperature*, kegagalan dapat terjadi dalam waktu yang sangat singkat. Kegagalan biasanya disebabkan oleh operasional *boiler* diluar kondisi desainnya. Kondisi yang menyebabkan *short-term overheating* parsial karena aliran pendingin tidak memadai karena kondisi yang tidak sesuai atau masukan panas yang berlebihan.



Kegagalan akibat *short-term overheat* biasa dikenal dengan pola “mulut ikan” karena bentuk permukaan yang pecah terbuka pada ujung yang tipis.



Gambar 2.10 Pipa yang mengalami *short-term overheat* (B. Prakash, 2013)

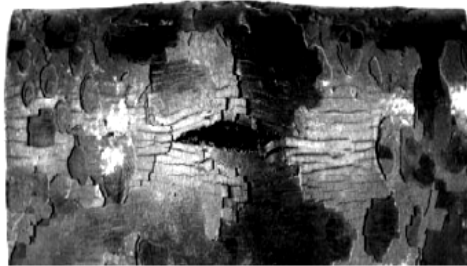
b. *Long-term overheating*

Overheating jenis ini membutuhkan periode yang lebih lama, berbulan-bulan atau bertahun-tahun hingga terjadi kegagalan. Kegagalan ini biasa terjadi pada dinding *furnace*, pipa penyaring (*screen tubes*), pipa bagian atas (*roof tubes*) dan *superheater*. Biasanya terjadi pada pipa yang sudah lama tidak diservis. Pipa logam yang biasanya mengalami *long-term overheat* memiliki terak eksternal yang sangat banyak dan terdapat retak sekunder.

Pipa dipaksa beroperasi pada temperatur melebihi design materialnya, kemudian struktur mikro mulai terdegradasi. Seiring kenaikan temperatur, *Pearlite* yang merupakan lapisan struktur Karbida Besi (Fe_3C) dan *Ferrite*, bentuk Karbida Besi menjadi tidak stabil sehingga ingin membentuk kondisi stabil. Ada dua cara untuk membuat Karbida Besi stabil, dengan memisahkan diri menjadi Besi dan Karbon (*graphitising*) atau membentuk karbida besi spheroids (*spheroidisation*). Temperatur operasi akan



menentukan degradasi yang terjadi, namun syaratnya harus diatas 450 °C. Temperatur bisa naik dengan penambahan unsur lain seperti *Chromium* dan *Molybdenum*. *Graphitising* terjadi pada temperatur yang lebih rendah dari *spheroidising*. Mekanisme yang terbentuk tergantung pada waktu dan temperatur tertentu. Kemudian timbul *creep* pada *tube* akibat temperatur tinggi, serta naiknya nilai regangan hingga akhirnya tube pecah (*stress rupture*).



Gambar 2.11 Pipa yang mengalami *long-term overheat* (B. Prakash, 2013)

2.6.5. Erosion

Erosi adalah suatu peristiwa terkikisnya material pada permukaan yang solid akibat adanya interaksi mekanik antara permukaan material dengan fluida, multi komponen fluida, cairan yang menempel, atau partikel solid yang menempel (ASM Handbook, Vol. 11, 2002:2129).

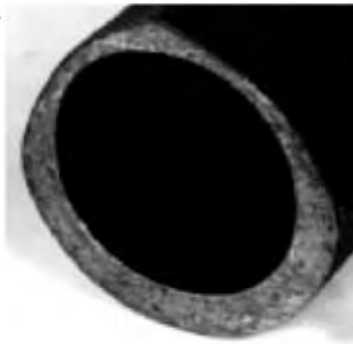
Media erosi juga bisa akibat dari pembakaran gas pada aliran uap yang bersifat abrasif, namun kebanyakan kasus yang terjadi berhubungan dengan partikel abu yang bertebaran lalu menempel pada pipa *boiler* dan akibat uap yang disemprotkan dari *sootblower*.

Pada industri pembangkit listrik tenaga uap, erosi biasa terjadi pada pipa *boiler*, pipa dinding air, turbin gas, sistem transportasi material solid, katup, dan *nozzle*. Variasi mekanisme



erosi yang terjadi pada *boiler* biasanya erosi akibat abu, erosi akibat soot blower, erosi akibat terak yang jatuh dan bertebaran, erosi akibat partikel batubara. Erosi abu adalah erosi pada pipa *boiler* yang mendapat perhatian signifikan. Erosi ini biasa terjadi pada daerah dengan kecepatan aliran gas lokal yang tinggi dengan beban abu yang tinggi dan partikel yang abrasif seperti quartz.

Setelah timbul gejala terkikisnya pipa *boiler*, mengakibatkan sisi pipa akan menjadi berbahaya. Hingga akhirnya kegagalan dengan pecahnya pipa akan terjadi akibat naiknya nilai regangan pada pipa yang mengalami erosi.



Gambar 2.12 Erosi pada *tube boiler* (Babcock & Wilcox Power Generation Group, 2013)

2.6.6. Stress Corrosion Cracking

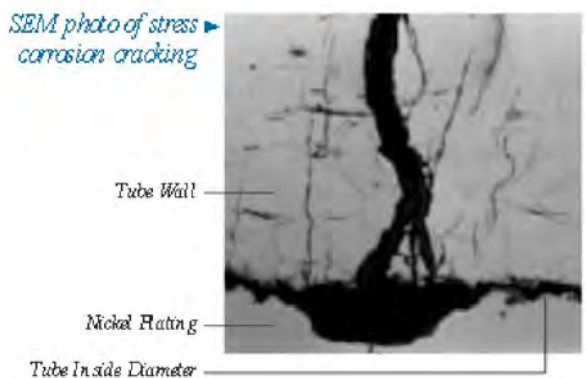
Stress corrosion cracking (SCC) merupakan salah satu mekanisme kegagalan material yang melibatkan tegangan tarik dan serangan dari lingkungan yang korosif. Karakteristik dari korosi ini adalah perpatahannya yang getas dimana retakan terjadi dengan regangan yang kecil dari material. Perpatahan getas tersebut terjadi pada daerah yang memiliki tegangan tarik eksternal tinggi dan hadirnya fluida bersifat korosif.

Ada tiga kondisi yang secara simultan terjadi sehingga dapat menimbulkan *stress cracking corrosion*. Pertama adanya lingkungan yang bersifat korosif, kedua adanya paduan material



yang memiliki kemampuan untuk mengalami SCC, dan ketiga adanya tegangan yang cukup tinggi.

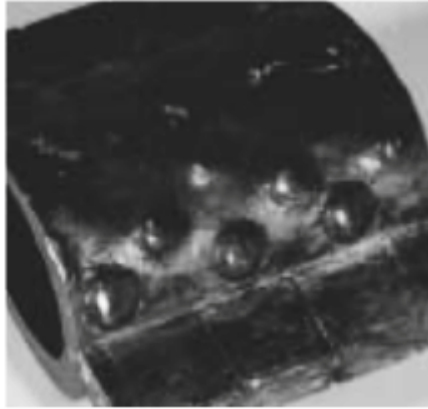
Komponen *tube boiler* yang sering mengalami SCC adalah komponen dengan material *Austenitic stainless steel*, seperti pada *tube superheater*. Perambatan retak yang mungkin terjadi pada *tube* akibat SCC bisa berupa *transgranular* maupun *intergranular*.



Gambar 2.13 *Stress corrosion cracking* (Babcock & Wilcox Power Generation Group, 2013)

2.6.7. Waterwall Fireside Corrosion

Waterwall fireside corrosion terjadi ketika bagian eksternal *tube* logam mengalami penipisan akibat meningkatnya regangan. Korosi terjadi pada permukaan eksternal *tube* ketika proses pembakaran pada bagian paling bawah *furnace*. Korosi jenis ini sering ditemukan pada *boiler* konvensional dengan pembakaran fosil batubara. *Boiler* biasanya tidak dapat menyesuaikan diri dengan *burners*, yang beroperasi pada zona pembakaran yang tinggi sehingga lebih rentan terjadi peningkatan laju korosi.



Gambar 2.14 *Waterwall fireside corrosion pada tube (Babcock & Wilcox Power Generation Group, 2013)*

2.7 Uji Kekerasan

Pada umumnya, kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi dan merupakan ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen (Dieter, 1987). Hal ini sering diartikan sebagai ukuran kemudahan dan kuantitas khusus yang menunjukkan nilai kekerasan material.

Pada pengujian kekerasan terdapat tiga jenis ukuran kekerasan, hal ini tergantung pada cara melakukan pengujian, yaitu:

1. Kekerasan goresan (*scratch hardness*),
2. Kekerasan lekukan (*indentation hardness*),
3. Kekerasan pantulan (*rebound*)

Pengujian yang sering dilakukan pada logam adalah pengujian kekerasan indentasi. Pada model ini kekerasan suatu material diukur terhadap tahanan plastis dari permukaan suatu material komponen konstruksi mesin dengan spesimen standart terhadap *indenter*. Terdapat berbagai macam uji kekerasan indentasi, antara lain: uji kekerasan *Brinell*, *Vickers*, *Rockwell*, dan *Knoop*.



Kekerasan menurut standard ASTM A210 grade A-1 adalah 143 HB. Metode pengujian kekerasan yang dilakukan pada penelitian adalah dengan menggunakan *Brinell Hardness Testing*.

2.7.1. Uji Kekerasan Brinell

Uji brinell dilakukan dengan penekanan sebuah bola baja yang terbuat dari baja chrom yang telah dikeraskan dengan diameter tertentu, oleh gaya tekan secara statis kedalam permukaan logam yang diuji harus rata dan bersih. Setelah gaya tekan diiadakan dan bola baja dikeluarkan dari bekas lekukan, maka diameter paling atas dari lekukan tadi diukur secara teliti untuk kemudian dipakai untuk penentuan kekerasan logam yang diuji dengan menggunakan rumus:

$$BHN = \frac{2P}{\pi D [(D - \sqrt{D^2 - d^2})]}$$

Dimana :

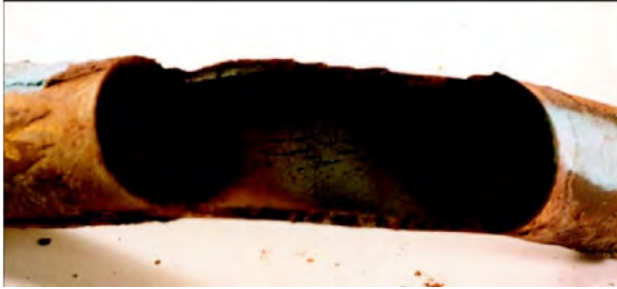
P = Beban yang diberikan (KP atau Kgf).

D = Diameter indenter yang digunakan.

d = Diameter bekas lekukan.

2.8 Penelitian Sebelumnya

Bobcock & Wilcox *power generation group* pada tahun 2002 melakukan penelitian pada riser tube yang belok (*bend*) dan ditemukan terdapat *corrosion fatigue* pada bagian dalam pipa yang belok. Mekanisme terbentuk *crack* diawali adanya indikasi retakan yang paralel dengan sumbu pipa dan terjadi pada lokasi yang diserang korosi *pitting* internal. Kemudian retak merambat pada pipa hingga akhirnya muncul kebocoran *pinhole* pada pipa, lalu seiring berjalannya waktu, pipa pecah.



Gambar 2.15 *Corrosion fatigue pada bending tube*
(Babcock & Wilcox Power Generation Group, 2002)

Beberapa kondisi yang berkontribusi terjadinya *corrosion fatigue*:

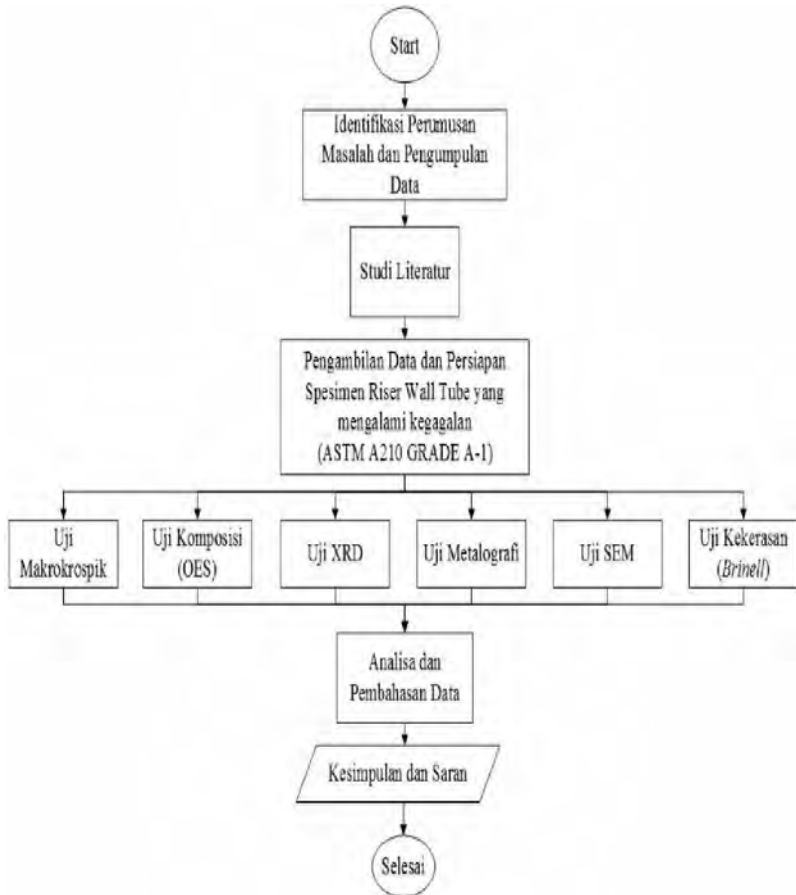
- Kontrol komposisi kimia air boiler yang buruk
- Waktu servis yang terlalu lama
- Siklus *boiler start-up* dan *shut-down* yang sering dilakukan



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.



3.2 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini antara lain studi lapangan, studi literatur, dan penelitian di laboratorium. Studi lapangan mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalannya dengan cara terjun langsung ke industri PLTU. Studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal penelitian terbaru, *handbook* dan situs industri yang mempelajari permasalahan analisa kegagalan pada *tube wall riser* dan *tube boiler*. Sedangkan penelitian di laboratorium mengacu pada pengujian-pengujian yang mendukung proses analisa. Pengujian yang dilakukan antara lain uji makroskopik, uji komposisi kimia, metalografi, uji kekerasan, uji XRD dan uji tensile.

3.3 Material yang digunakan

Material yang digunakan adalah ASTM A210 Grade A-1.

Tabel 3.1 Spesifikasi *Riser Wall Tube*

No. <i>Tube</i>	Material	ASTM A210 GRADE A-1
3	Dimensi (OD x thickness)	Ø48x6 mm
	Posisi	<i>Backpass Upper Front Wall</i>
	Temperatur Desain	393 °C
	Tekanan Desain	19.79 MPa



Gambar 3.2 *Riser wall tube yang rusak*

3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara adalah sebagai berikut:

1. Mesin Potong
2. Mesin Spektrometer
3. Kertas Gosok *Grade 180* hingga *Grade 2000*
4. Mesin *Polish*
5. Mesin *Grinding*
6. Mikroskop Optik
7. Mesin Uji Kekerasan
8. Mesin SEM
9. Mesin XRD
10. Kamera Digital

3.5 Tahapan Penelitian



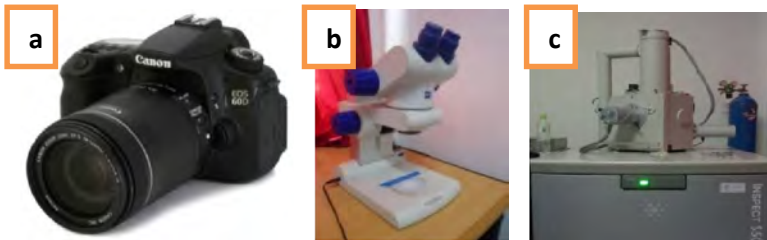
3.5.1 Pengambilan dan Persiapan Spesimen

Pertama dilakukan pengambilan spesimen penelitian diambil dari PT X, Pelabuhan Ratu, Jawa Barat. Persiapan spesimen dilakukan sebelum melakukan pengujian untuk menentukan penyebab kegagalan *riser wall tube* dengan pemotongan pipa karena dimensi yang terlalu besar. Persiapan Spesimen dilakukan dengan pemotongan karena dimensi spesimen yang terlalu besar. Proses pemotongan ini dilakukan dengan menggunakan gergaji, gerinda tangan, dan *cutting wheel*.

3.5.2 Uji Makroskopik

Pengamatan makroskopik dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan, dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro (kasat mata). Pengamatan ini dilakukan dengan mikroskop kamera digital *Canon 60D* dan *stereomicroscope*.

Pengamatan makroskopik dilakukan pada komponen yang mengalami kegagalan. Uji fraktografi juga dilakukan pada pengamatan makroskopik.



Gambar 3.3 Alat uji makroskopik dan fraktografi. (a) Kamera digital *Canon 60D*, (b) *Stereomicroscope*, dan (c) *Scanning Electrone Microscope*.



3.5.3 Pengujian Komposisi Kimia

Identifikasi kimia dilakukan untuk mengetahui unsur apa saja yang terdapat pada komponen secara kuantitatif. Pada identifikasi komposisi kimia ini dilakukan dengan metode *Optical Emission Spectroscopy* (OES).



Gambar 3.4 Mesin uji spektroskopi *PMI-MasterPro*

Identifikasi komposisi kimia dilakukan pada material tube yang jauh dari patahan. Hal ini dilakukan sehingga dapat menganalisa komposisi kimia material apakah sesuai dengan standard ASTM A210 grade A-1. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *PMI-MasterPro*.

Sebelumnya, sampel yang melengkung terlebih dulu diratakan dengan menggunakan gerinda. Sehingga proses pengujian dapat dilakukan dengan akurat.



3.5.4 Pengujian XRD

Karakterisasi difraksi sinar-X (XRD) dilakukan menggunakan alat *Pan Analytical XRD* dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Teknik Material dan Metalurgi. Karakterisasi ini dilakukan untuk melihat senyawa yang terbentuk pada permukaan tube yang mengalami kegagalan. Senyawa yang berhasil diidentifikasi merupakan salah satu faktor yang mempercepat terjadinya kegagalan.

Tahap pertama yang dilakukan dalam analisa sinar-X adalah melakukan analisa pemeriksaan terhadap sampel yang belum diketahui strukturnya. Sampel ditempatkan pada titik fokus hamburan sinar-X yaitu tepat di tengah-tengah *plate* yang digunakan sebagai tempat yaitu sebuah plat tipis yang berlubang di tengah berukuran sesuai dengan sampel (pelet) dengan perekat pada sisi baliknya.

Spesimen dengan daerah yang mengalami patahan dibandingkan dengan spesimen yang letaknya jauh dari patahan, kemudian dianalisa menggunakan XRD dengan mesin PANanalytical seperti yang terlihat pada Gambar 3.12. Data dan grafik hasil pengujian XRD selanjutnya dicocokkan dengan JCPDS (*Joint Committee of Powder Diffraction Standard*) dan software *Highscore* untuk mengetahui senyawa yang sesuai.



Gambar 3.5 Mesin XRD PANanalytical



3.5.5 Pengujian SEM

Uji SEM dilakukan untuk mengetahui profil permukaan patahan *Scanning Electron Microscope* (SEM) *Inspect S50*. Pengamatan fraktografi juga dilakukan dengan alat uji SEM.



Gambar 3.6 *Scanning Electron Microscope (SEM) Inspect S50*

Untuk uji fraktografi, sampel material yang diuji SEM hanya dilakukan proses pemotongan pada daerah patahan sebelum diuji. Sementara untuk melihat batas butir material, sebelum dilakukan pengujian SEM, sampel material dibersihkan terlebih dahulu dengan metode blowing untuk menghindari adanya kotoran-kotoran yang menempel, seperti oli, debu, keringat, dan lain sebagainya.

3.5.6 Pengujian Mikroskopik Mikroskop Optik

Pada pengamatan mikroskopik dengan mikroskop optik dilakukan untuk menganalisa fasa, bentuk, dan ukuran strukturmikro. Hal ini digunakan untuk mengetahui proses



manufaktur yang terjadi pada material tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik *Olympus BX51M-RF*.

Pada pengujian metallografi dibagi menjadi dua tahap, yaitu :

1. Tahap persiapan

- *Mounting* : Membuat cetakan pada spesimen dengan resin agar proses penggosokan menjadi lebih mudah
- *Grinding* : Menggosok spesimen dengan kertas gosok grade 80 – 2000 dan dialiri dengan air. Spesimen diputar 90° atau tegak lurus terhadap arah gosokan ketika pindah grade.
- *Polishing* : Memoles spesimen dengan pasta alumina di atas piringan yang berputar cepat. Proses ini akan menghasilkan permukaan yang mengkilat seperti cermin.
- *Etching* : Mencelup permukaan spesimen ke dalam larutan nital 2% (Alkohol 98% dan HNO_3 2%)

2. Tahap pengamatan

- Tahap pengamatan dilakukan untuk mengamati struktur mikro spesimen dengan mikroskop optik dengan beberapa kali perbesaran.



Gambar 3.7 Mikroskop optik *Olympus BX51M-RF*

3.5.7 Pengujian Kekerasan Brinell

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode Brinell dimana dalam pengujiannya memakai indenter bola baja, pembebanan sebesar 187.5 kgf dan waktu indentasi selama 15 detik. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS.



Gambar 3.8 *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A*



Sebelumnya, sampel yang digunakan harus memiliki permukaan yang rata untuk menghindari cacat indentasi.

3.6 RANCANGAN PENELITIAN

Tabel 3.2 Rancangan penelitian

Jenis Material	Pengujian					
	Makroskopik	OES	XRD	Metalografi	SEM	Hardness
ASTM A210 Grade A-1	v	v	v	v	v	v

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1. Historis Operasional

Pada bulan Agustus 2015 terjadi kebocoran *riser wall tube* nomor 2 dan nomor 3 PLTU unit 2 PT X. Boiler pada unit 2 baru diinstalasi tahun 2012 dengan pemakaian 8000 jam. *Tube* yang memiliki diameter luar 48 mm dan tebal 6 mm beroperasi sesuai standard desain dengan temperatur 393 °C dan tekanan 19.79 MPa atau 195.31 atm. Kronologi kejadian diawali oleh bocornya pipa nomor 2 lalu disusul kebocoran pipa nomor 3.

4.1.2. Hasil Pengamatan Makroskopik

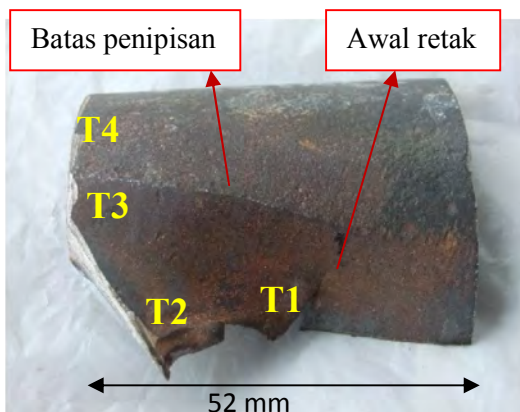
Berdasarkan hasil pengamatan makroskopik menggunakan kamera digital pada daerah komponen *riser wall tube* pada gambar 4.1, didapat gambar lokasi awal patahan pada gambar 4.2.



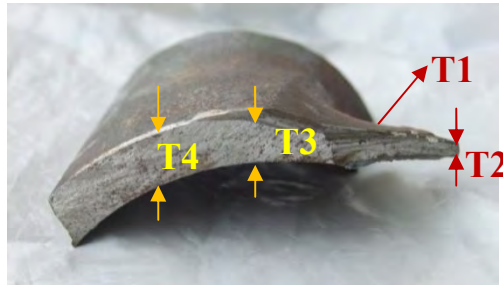
Gambar 4.1 Gambar *riser wall tube* nomor 3 ASTM A210 grade A-1



Gambar 4.2 Sisi samping patahan *riser wall tube* nomor 3 ASTM A210 grade A-1



Gambar 4.3 Gambar daerah awal patahan *riser wall tube* nomor 3 ASTM A210 grade A-1



Gambar 4.4 Sisi samping daerah awal patahan *riser wall tube* nomor 3 ASTM A210 grade A-1

T1= 0.6 mm (Tebal pada awal retak)

T2= 2.2 mm (Tebal pada perambatan retak)

T3= 4.3 mm (Tebal pada awal penipisan)

T4= 6.0 mm (Tebal normal *tube*)

Dari **gambar 4.2**, dapat diketahui lokasi awal mula patahan pipa sebelum mengalami kebocoran. Terak juga dapat diamati secara jelas karena menempel sepanjang daerah patahan pipa seperti yang dapat dilihat pada **gambar 4.1**, **gambar 4.2**, dan **gambar 4.3**. Hal ini memperjelas bukti adanya mekanisme penurunan kualitas material pada *riser wall tube* nomor 3.

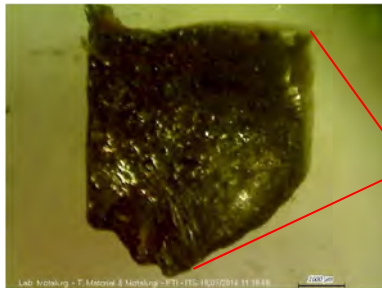
Pada **gambar 4.3**, diketahui terdapat 3 titik ketebalan yang mengalami penipisan. Tebal titik ke-1 (T1) terletak pada awal patahan, tebal titik ke-2 (T2) pada daerah perambatan, dan tebal titik ke-3 (T3). Tebal T1 adalah 0.6 mm, T2 sebesar 2.0 mm, dan T3 memiliki tebal 3.1 mm. Dilihat dari bentuk penipisan pipa pada **gambar 4.4** serta ukuran ketebalan dari T3 hingga T2, *riser wall tube* nomor 3 mengalami penipisan dari permukaan luar.

Pengamatan makroskopik fraktografi juga dilakukan dengan menggunakan alat stereomicroscope dan scanning electron microscope. Daerah awal retak dapat diamati bentuknya hingga morfologi permukaannya. Daerah yang dilakukan pengamatan pada daerah sekitar T1 atau awal retak.



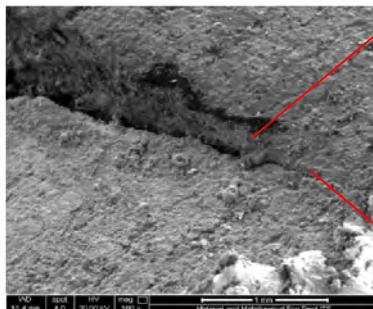
Daerah uji
fraktografi

Gambar 4.5 Daerah material yang diuji fraktografi



Penipisan pada
tube

(a)



Lokasi awal retak
pada *tube* akibat
penipisan

Tidak ada retak yang
menjalar masuk
kedalam permukaan
material

(b)

Gambar 4.6 Hasil pengamatan fraktografi. (a) Hasil uji *stereomicroscope* dan (b) hasil uji SEM.



Hasil pengamatan fraktografi membuktikan adanya penipisan pada *tube* sehingga mengalami retak mikro yang akhirnya menjadi retak makro. Hasil SEM juga menunjukkan tidak ada penjaralan retak hingga bagian dalam *tube*.

4.1.3. Hasil Pengujian Komposisi Kimia

Dibawah ini menunjukkan hasil pengujian komposisi kimia dengan *optical emission spectrometry* pada *riser wall tube* nomor 3 dengan perbandingan menurut ASTM A210 grade A-1.

Tabel 4.1 Tabel hasil pengujian komposisi kimia

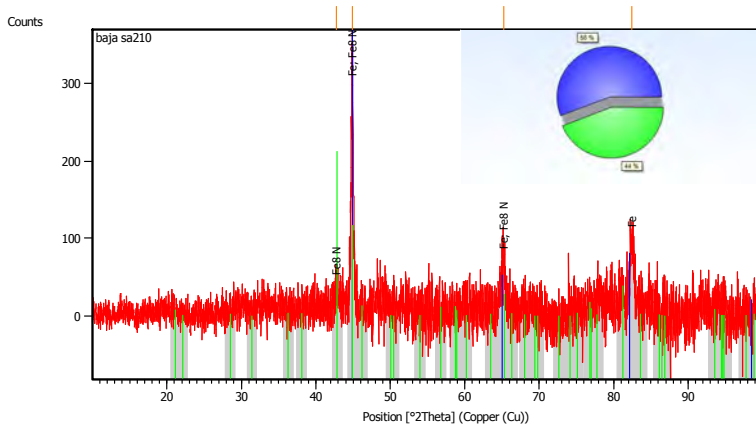
No.	Unsur	Nilai Kandungan Unsur (% berat)	Standar ASTM A210 Grade A1
1	C	0.175	0.27 max
2	Si	0.226	0.10 min
3	Mn	0.574	0.93 max
4	P	0.007	0.035 max
5	S	< 0.003	0.035 max
6	Cr	0.038	-
7	Mo	< 0.005	-
8	Ni	< 0.005	-
9	Al	0.004	-
10	Cu	0.051	-
11	Nb	< 0.002	-
12	Ti	< 0.002	-
13	V	0.004	-
14	Fe	Balance	-



Dari hasil pengujian komposisi, *riser wall tube* nomor 3 memiliki komposisi kimia yang tidak berbeda jauh dengan ASTM A210 *grade A-1*. Secara umum, komposisi material pipa sesuai standard ASTM A210 *grade A-1*.

4.1.4. Hasil Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan pada material daerah patahan dengan tujuan mengetahui senyawa yang terbentuk pada *tube* sehingga menjadi faktor yang mempercepat terjadinya penipisan. Didapati hasil pengujian XRD sebagai berikut:



Gambar 4.7 Grafik hasil uji XRD

Analisa hasil grafik pengujian XRD diidentifikasi dengan menggunakan software *Highscore Plus*. Hasil analisa sebagai berikut:



Tabel 4.2 Hasil analisa XRD

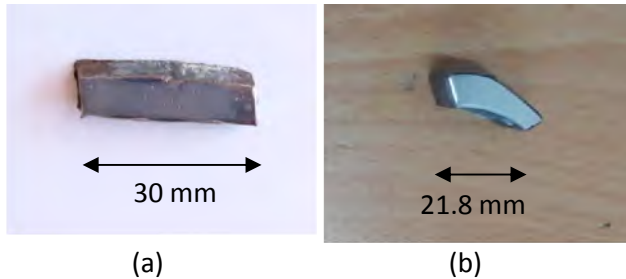
Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-085-1410	68	Iron	0.479	0.965	Fe
*	03-065-1587	13	Iron Nitride	0.124	0.457	Fe ₈ N

Hasil XRD menunjukkan adanya fasa Fe₈N (*Iron Nitride*) yang terbentuk ditunjukkan pada dua *peak* Fe₈N dalam grafik. Terbentuknya Fe₈N diakibatkan adanya senyawa oksida nitrogen NO_x yang merupakan efek dari pembakaran batubara pada boiler. *Riser wall tube* yang beroperasi pada temperatur 393 °C membuat mudahnya Fe untuk bereaksi dengan NO_x sehingga terbentuk fasa Fe₈N.



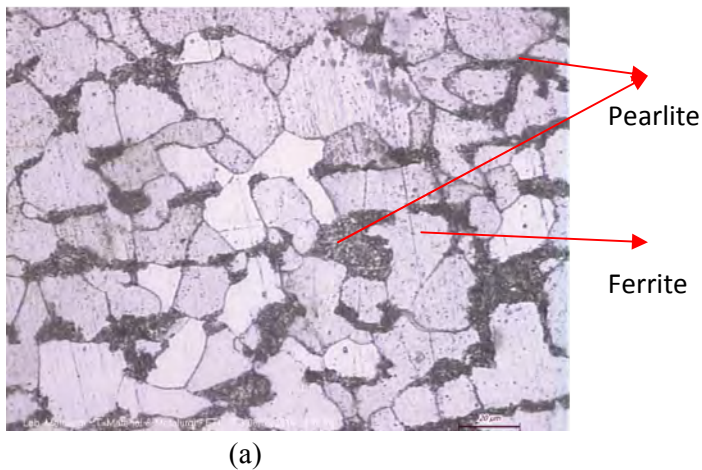
4.1.5. Hasil Pengujian Metalografi

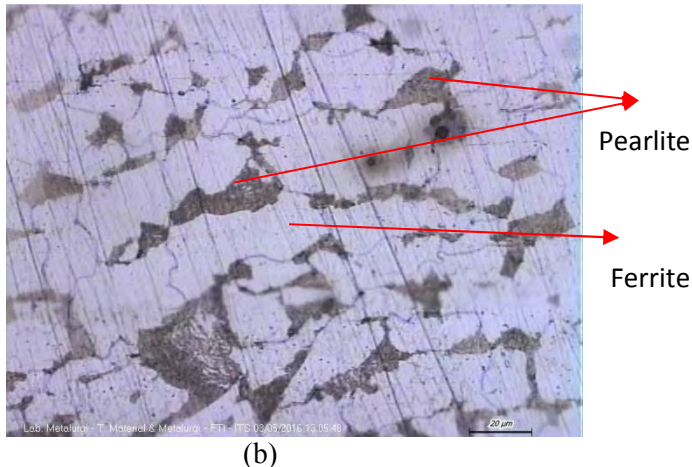
Dari hasil pengujian metalografi terlihat struktur mikro dari specimen yang diamati dibawah mikroskop optik. Pengujian struktur mikro ini menggunakan ASTM E3. Struktur mikro diketahui dengan cara mengkorosikan specimen secara terkontrol dengan larutan etsa nital 2%.



Gambar 4.8 Spesimen uji metalografi. (a) Spesimen jauh dari daerah patahan dan (b) spesimen daerah patahan.

Berdasarkan hasil pengujian metalografi, didapatkan fasa yang terbentuk pada struktur mikro sebagai berikut.





(b)
Gambar 4.9 Hasil pengujian metalografi perbesaran 500x.
(a) Spesimen jauh dari daerah patahan dan (b) spesimen daerah patahan.

Hasil pengujian melalui mikroskop optik menunjukkan fasa yang terdapat pada spesimen jauh dari patahan dan daerah patahan adalah *ferrite* dan *pearlite*. Fasa tersebut sesuai dengan diagram Fe-Fe₃C, **gambar 2.4**, yaitu baja dengan wt% karbon 0.15-0.27% pada temperatur dibawah 723 °C adalah *pearlite* dan *ferrite*.

Setelah mendapatkan struktur mikro pada **gambar 4.9**, terlihat batas butir material daerah patahan mengalami perpanjangan. Untuk mengetahui ukuran diameter rata-rata butir, dapat digunakan standard ASTM E112. Metode yang digunakan metode *Plainmetric*, dengan mengacu pada *Jeffries's Procedure*.

$$NA = f\left(N \text{ inside} + \frac{N \text{ intercept}}{2}\right)$$

$$d = \frac{1}{\sqrt{NA}}$$



Diketahui:

NA= Jumlah butir

f= Jeffries' multiplier

N inside= jumlah butir didalam lingkaran

N intercept= jumlah butir yang memotong lingkaran

D= diameter rata-rata butir

Gambar dan perhitungan batas butir dicantumkan pada lampiran halaman 67 dan 68. Sedangkan hasil akhir panjang butir diinterpretasikan pada tabel 4.2 dibawah ini.

Tabel 4.2. Hasil perhitungan diameter butir

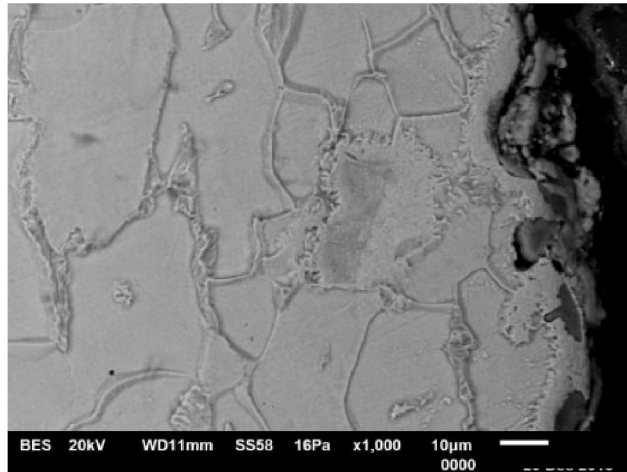
Spesimen	Diameter rata-rata (mm)
Jauh patahan	0,028
Daerah patahan	0,041
% pertambahan ukuran butir	46,43%

Hasil perhitungan ukuran butir menunjukkan adanya perpanjangan ukuran butir hingga mencapai 46.31%.



4.1.6. Hasil Pengujian SEM

Pengujian *Scanning Electrone Microscope* dilakukan untuk melihat *micrograph* permukaan pada daerah awal patahan.



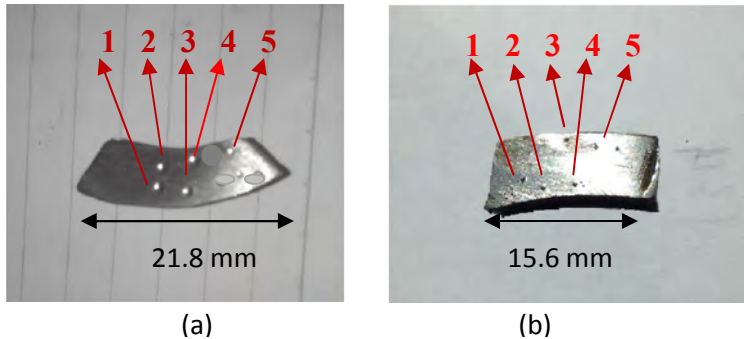
Gambar 4.10 Hasil pengujian SEM

Hasil pengujian SEM menunjukkan adanya butir yang mengalami elongasi. Hasil tersebut mendukung hasil pengujian metalografi yaitu adanya pemanjangan butir mencapai 46,43%.



4.1.7. Hasil Pengujian Kekerasan

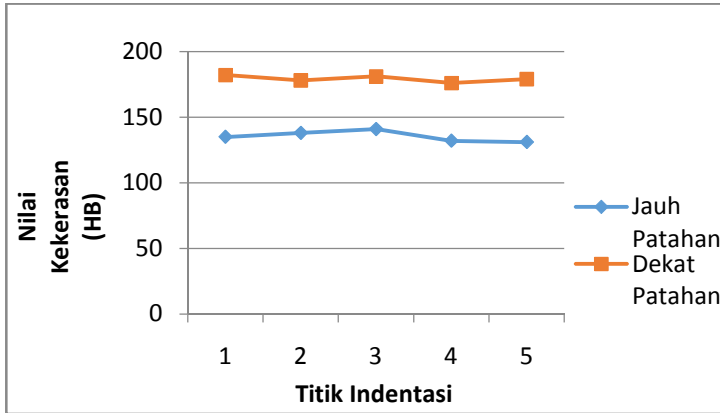
Hasil pengujian kekerasan dilakukan dua kali, yaitu pada daerah jauh dari patahan dan dekat patahan.



Gambar 4.11 Hasil indentasi spesimen. (a) Dekat patahan dan (b) jauh patahan

Tabel 4.4 Hasil pengujian kekerasan

Indentasi	Nilai Kekerasan (HB)		
	Jauh Patahan	Dekat Patahan	Standard (Maksimum)
1	135	182	143
2	138	178	
3	141	181	
4	132	176	
5	131	179	
Rata-rata	135,4	179,2	



Gambar 4.12 Grafik hasil pengujian kekerasan

Hasil pengujian kekerasan menunjukkan adanya perbedaan nilai kekerasan pada spesimen daerah patahan dan daerah jauh dari patahan. Nilai rata-rata kekerasan pada daerah patahan mencapai 179.2 HB yang berarti jauh melebihi batas maksimum standard nilai kekerasan menurut ASTM A210 Grade A-1 yaitu 143 HB

4.1.8. Ketebalan Minimum Pipa

Berdasarkan *ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section I Part PG 27.2.2*, ketebalan minimum pipa yang diijinkan supaya tidak mengalami patah dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S = \frac{P \times D}{2 \times t} + 0.005D + e$$

Diketahui nilai tekanan 19.79 Mpa, diameter luar 48 mm, *allowable stress* pada 393°C adalah 102.632 Mpa, maka dapat diketahui nilai ketebalan:



$$t = \frac{19.79 \times 48}{2 \times 102.632} + 0.005 (48) + 0$$

$$t = 4.87 \text{ mm}$$

Maka diperoleh hasil ketebalan minimum yang diijinkan menurut desain pipa 4.87 mm. Jika dibandingkan dengan tebal pada daerah patahan T1, T2, dan T3, maka daerah tersebut tidak memenuhi persyaratan ketebalan minimum.

4.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, faktor-faktor penyebab kegagalan dapat disederhanakan menjadi beberapa aspek, yaitu material dan kondisi lingkungan yang ekstrem.

Berdasarkan hasil pengamatan makroskopik melalui **gambar 4.1** dan **gambar 4.2**, *riser wall tube* nomor 3 ASTM A210 grade A-1 mengalami penipisan ketebalan dari luar akibat serangan partikel lain hingga timbulnya retak yang diamati melalui fraktografi. Serangan erosi menyebabkan pipa mengalami penipisan dari luar seperti yang bisa dilihat pada **gambar 4.3**. Pada **gambar 4.3** juga dapat menunjukkan batas daerah *tube* yang mengalami penipisan. Daerah tersebut merupakan daerah awalnya *tube* menipis hingga mengalami pengurangan ketebalan.

Pengujian XRD menunjukkan adanya fasa Fe_xN (Iron Nitride) yang terbentuk. Fasa Fe_xN terbentuk akibat Fe pada *tube* bereaksi dengan NO_x dari emisi pembakaran batubara. Menurut Woodruff (2004), emisi nitrogen oxide berasal dari dua sumber, yaitu nitrogen dari senyawa batubara yang mengalami oksidasi dan reaksi antara oksigen dan nitrogen pada udara pembakaran. Temperatur *tube* yang mencapai 393°C mempercepat terbentuknya reaksi antara Fe dan NO_x sehingga terbentuk Fe_xN . Fasa Fe_xN yang terbentuk pada material menimbulkan korosi atau erosi pada baja.

Hasil pengamatan melalui pengujian metalografi dengan larutan etsa Nital 2% dengan perbesaran 500x pada **gambar 4.9**,



didapati fasa-fasa yang terbentuk pada daerah patahan dan daerah jauh dari patahan *Pearlite* dan *Ferrite*. Hal ini sesuai dengan diagram Fe-Fe₃C, gambar 2., yaitu baja dengan wt% karbon 0.15-0.27% pada temperatur dibawah 723 adalah *Pearlite* dan *Ferrite*. Sementara dari hasil perhitungan ukuran butir menurut metode *Planimetric* atau prosedur *Jeffries* menunjukkan adanya pemanjangan ukuran butir daerah patahan sebesar 46,43%.

Micrograph butir *riser wall tube* dapat ditunjukkan melalui hasil pengamatan *scanning electrone microscope* pada daerah ujung pipa yang mengalami penipisan melalui **gambar 4.10**. Hasil pengamatan menunjukkan adanya pertambahan panjang pada butir-butir *tube*. Hasil pengujian SEM mendukung hasil pengujian metalografi adanya pertambahan ukuran butir 46,43%.

Sedangkan hasil pengujian kekerasan dimana nilai kekerasan pada daerah patahan mencapai 179.2 HB. Nilai kekerasan tersebut melebihi nilai standard maksimum yaitu 143 HB.

Gambar 4.3 dan **gambar 4.4** menunjukan ketebalan pipa pada daerah sekitar patahan. Ketebalan pipa pada daerah awal patahan (T1) sebesar 0.6 mm, sementara pada daerah perambatan patahan ketebalan pipa sebesar 2.2 mm (T2). Pada daerah akhir patahan (T3) sebesar 4.3 mm. Sedangkan hasil perhitungan ketebalan minimum pipa yang diijinkan didapati nilai sebesar 4.87 mm. Nilai T1 jauh dari batas ketebalan pipa yang diijinkan sedangkan nilai T2 nilainya mendekati batas minimal ketebalan pipa. Sementara T3 memiliki ketebalan yang lebih kecil dari desain pipa namun masih masuk batas ketebalan minimum pipa. Dari nilai T1, T2, dan T3 dapat disimpulkan daerah patahan *tube* tidak diijinkan menurut desain minimum pipa dengan standard *ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section I Part PG 27.2.2*. Penipisan pipa dapat diamati melalui **gambar 4.2** dan **gambar 4.4**. Melalui **gambar 4.4** dan nilai T1, T2, dan T3, dapat diamati bahwa penipisan pipa terjadi seiring berkurangnya ketebalan pipa pada titik T3 hingga menuju T2. **Gambar 4.2** dan **gambar 4.4** juga menunjukan bahwa adanya penipisan berasal dari luar.



Hasil-hasil pengamatan dan pengujian menunjukkan adanya penipisan pipa dari permukaan luar akibat serangan dari kebocoran *riser wall tube* nomor 2 yang berisi uap dengan tekanan 195.31 atm dan temperatur 393°C ditambah fasa Fe_8N yang terbentuk pada *tube* akibat emisi pembakaran batubara. Ilustrasi awal mula terjadi kebocoran bisa dilihat pada **gambar 4.13**.



Gambar 4.13 Lokasi kebocoran *riser wall tube*

Ketika *tube* nomor 3 terkena semburan uap panas, *tube* mengalami erosi. Mekanisme terjadinya erosi diawali material mengalami keausan sehingga sifat mekanik kekerasannya berkurang. Serangan uap panas menyebabkan *tube* yang lunak



mudah menipis dimulai dari T4, T3, T2, hingga T1 pada **gambar 4.3** dan **gambar 4.4**. Nilai ketebalan yang tidak memenuhi standard ijin minimum pada T1 dan T2 menyebabkan *tube* sangat mudah timbul *crack* dan pecah, apalagi temperatur *tube* juga tinggi akibat serangan uap. Hingga pada nilai T1 pada ketebalan 0.6 mm *tube* mengalami awal retakan pada permukaan sesuai dengan pernyataan Nishida (1992). Kemudian retakan material merambat menuju daerah lain seperti pada **gambar 4.1** dan **gambar 4.3**. Retakan merambat hingga titik T3 hingga pada T3 *tube* pecah. Timbulnya fasa Fe_3N mempercepat terjadinya korosi erosi. Saat *tube* sudah pecah dan terindikasi oleh perusahaan adanya kebocoran *tube*, boiler dilakukan proses *shutdown*. Kemudian *tube* yang sudah pecah mengalami peristiwa deformasi plastis.

Menurut Avner (1974), deformasi plastis pada material menyebabkan terjadinya pertambahan panjang ukuran butir diiringi naiknya sifat mekanik kekerasan dan kekuatan serta turunnya sifat mekanik keuletan. Hasil analisa menunjukkan terjadinya deformasi plastis pada *tube* setelah pecah dengan nilai kekerasan 179.2 HB dan pertambahan ukuran butir menurut struktur mikro sebesar 46.43%. Peristiwa pertambahan ukuran butir material dengan naiknya nilai kekerasan juga biasa disebut penguatan regang (*strain hardening*).



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

A. ASTM A210 Grade A-1 Tensile dan Allowable Stress Data

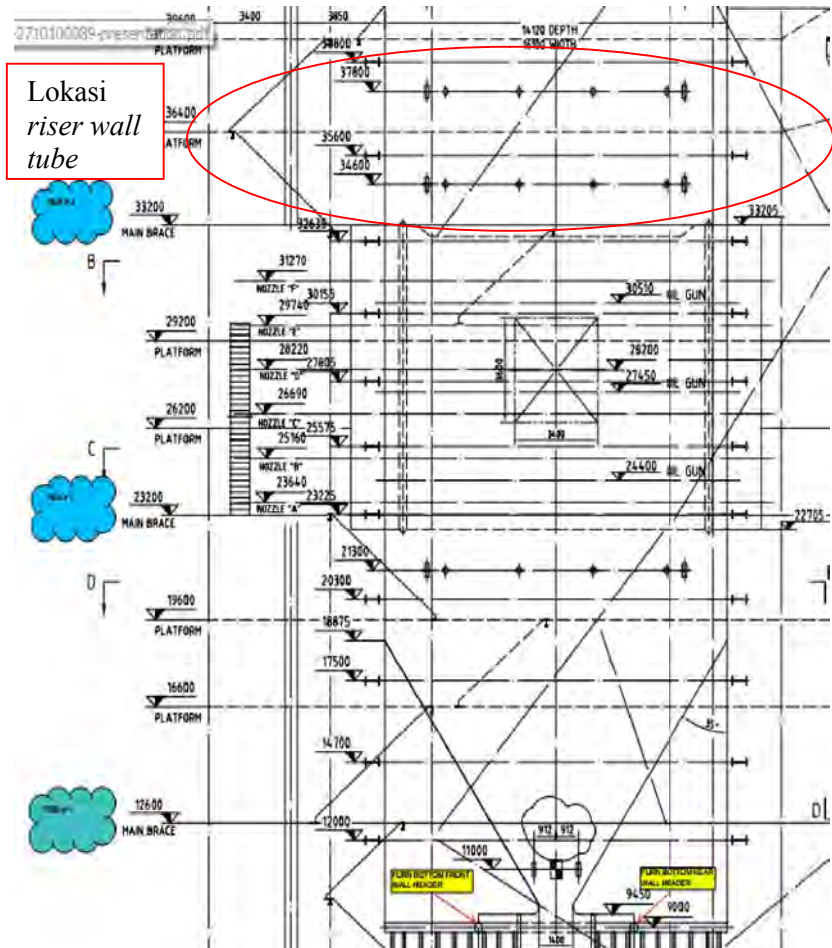
Tensile Requirements		
	Grade A-1	Grade C
Tensile strength, min, ksi [MPa]	60 [415]	70 [485]
Yield strength, min, ksi [MPa]	37 [255]	40 [275]
Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %	30	30
For longitudinal strip tests, a deduction shall be made for each 1/2-in. [0.8-mm] decrease in wall thickness under 5/16-in. [8 mm] from the basic minimum elongation of the following percentage points	1.50 ^A	1.50 ^A
When standard round 2-in. or 50-mm gage length or smaller proportionally sized specimen with the gage length equal to 4D (four times the diameter) is used	22	20

Nominal Composition	Product Form	Spec No	Grade	Maximum Use Temperature
Carbon Steel	Seamless Tube	A210	A-1	538

ASTM A210 Grade A-1 Maximum Allowable Stress for metal temperature °C, Not Exceeding										
30 to 40	65	100	150	200	250	300	325	350	375	400
170	160	155	150	146	140	133	129	125	122	95



B. Sketsa Boiler





Laporan Tugas Akhir

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS

图例 LEGEND

- ✦ 炉膛吹灰器 WALL SOOT BLOWER
- ✦ 伸缩式吹灰器 LONG RETRACTABLE SOOT BLOWER
- ✦ 伸缩式吹灰器 LONG RETRACTABLE SOOT BLOWER(FUTURE)
- ✦ 测温探针 GAS TEMPERATURE PROBE
- ✦ 电视摄像头 FURNACE T.V. CAMERA

- ✦ 观察孔 OBSERVATION DOOR
- ✦ 仪表测量 INSTRUMENT INSERT
- ✦ 检修孔 (Φ450) ACCESS DOOR
- ✦ 检修孔 (属于非受热面) ACCESS DOOR
(FOR UNFIRED HEATING ELEMENTS)

REFERENCE DRAWINGS:

- 1. BOILER GEN. ARRGT. (FRONT VIEW) — 900741-E1 SHEET 2 OF 4
- 2. BOILER GEN. ARRGT. (A-A B-B SECTION) — 900741-E1 SHEET 3 OF 4
- 3. BOILER GEN. ARRGT. (C-C D-D SECTION) — 900741-E1 SHEET 4 OF 4

SHANGHAI ELECTRIC GROUP CO. LTD PT. MAXIMA INFRASTRUKTUR	
CLIENT PT. PLN (PERSERO) KANTOR PUSAT	
CONSULTANT ENGINEERING	
PROJECT PLTU 2 JAWA BARAT PALABUHANRATU, WEST JAVA 3 x (300 - 400 MW)	
 上海锅炉厂有限公司 SHANGHAI BOILER WORKS LTD.	印尼公主港电厂(3x350MW)机组锅炉 锅炉总图(侧视图) BOILER GENERAL ARRANGT. DRAWING (SIDE VIEW)
设计 DRAWING BY 2008.02.25	审核 CHECKED BY 日期 DATE 140
工艺 PROCESSING BY 日期 DATE	材料 MATERIAL BY 日期 DATE
审核 CHECKED BY 日期 DATE	材料 MATERIAL BY 日期 DATE
图号 DRAWING NO. 900741-E1	



C. Metode Plainmetric (Jeffries' Procedure) ASTM E112

TABLE 5 Relationship Between Magnification Used and Jeffries' Multiplier, f , for an Area of 5000 mm² (a Circle of 79.8-mm Diameter) ($f = 0.0002 M^2$)

Magnification Used, M	Jeffries' Multiplier, f , to Obtain Grains/mm ²
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75 ^A	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

$$NA = f(N \text{ inside} + \frac{N \text{ intercept}}{2})$$

$$d = \frac{1}{\sqrt{NA}}$$

Diketahui:

NA= Jumlah butir

f = Jeffries' multiplier

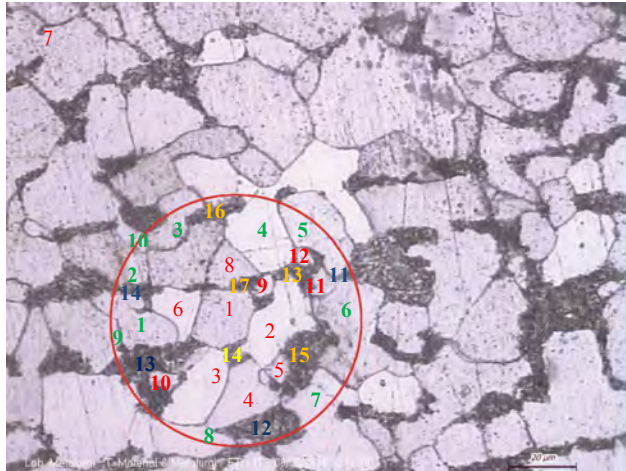
N inside= jumlah butir didalam lingkaran

N intercept= jumlah butir yang memotong lingkaran

D= diameter rata-rata butir



D. Gambar dan Perhitungan Batas Butir



Gambar spesimen jauh dari patahan

Angka dengan warna merah dan kuning (*pearlite*) menunjukkan jumlah butir pada N inside. Sementara angka berwarna hijau dan biru (*pearlite*) menunjukkan jumlah butir N outside.

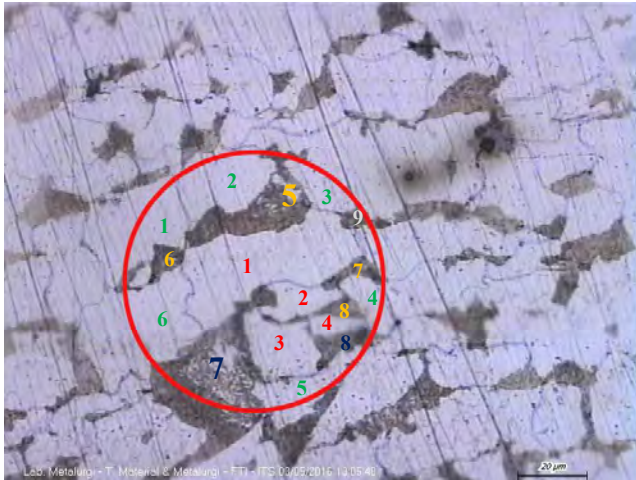
Hasil perhitungan batas butir:

$$NA = 50\left(17 + \frac{14}{2}\right)$$

$$NA = 1200$$

$$d = \frac{1}{\sqrt{1200}}$$

$$d = 0.028 \text{ mm}$$



Gambar daerah patahan

Angka dengan warna merah dan kuning (*pearlite*) menunjukkan jumlah butir pada N inside. Sementara angka berwarna hijau dan biru (*pearlite*) menunjukkan jumlah butir N outside.

Hasil perhitungan batas butir:

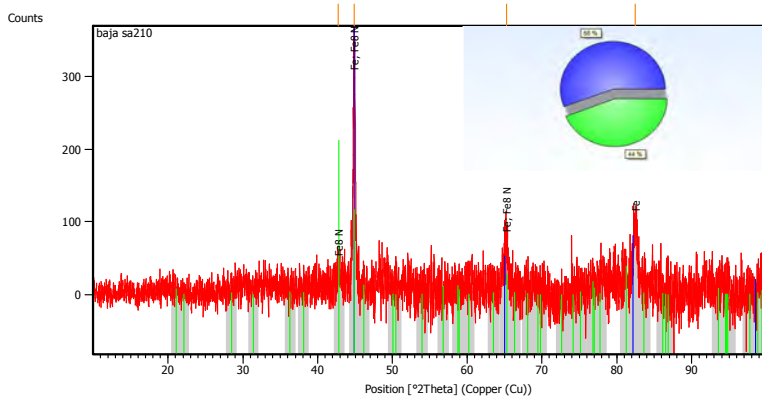
$$NA = 50\left(8 + \frac{9}{2}\right)$$
$$NA = 625$$

$$d = \frac{1}{\sqrt{625}}$$

$$d = 0.041 \text{ mm}$$



E. Data Peak Uji XRD



Peak List

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.7491	36.76	0.9368	2.11527	9.98
44.8781	368.27	0.2342	2.01974	100.00
65.2428	58.27	0.6691	1.43008	15.82
82.4960	83.52	0.5353	1.16929	22.68

Pattern List

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-085-1410	68	Iron	0.479	0.965	Fe
*	03-065-1587	13	Iron Nitride	0.124	0.457	Fe ₈ N



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan mengenai kegagalan *riser wall tube* pada *boiler*, antara lain sebagai berikut :

1. Faktor yang menyebabkan kegagalan pada *riser wall tube* adalah erosi.
2. Mekanisme terjadinya erosi dipicu terjadinya serangan kebocoran *tube* nomor 2 yang berisi uap panas dengan tekanan 195.31 atm dan temperatur 393 °C sehingga material menjadi lunak dan mudah mengalami penipisan dari permukaan luar serta timbulnya fasa Fe₈N akibat emisi NO_x pembakaran batubara mempercepat terjadinya erosi.
3. Hasil pengujian dan analisa terdapat 3 titik nilai ketebalan yang tidak memenuhi ijin ketebalan minimum *tube* sebesar 4.87 mm dengan fasa Fe₈N terbentuk pada *tube*. Sementara pada daerah patahan menunjukkan adanya penambahan ukuran butir 46.43% dengan nilai kekerasan yang lebih tinggi dari standard mencapai 179.2 HB membuktikan *tube* mengalami deformasi plastis setelah pecah.

5.2 Saran

Saran terhadap penelitian ini adalah:

1. Preparasi spesimen uji metalografi saat penggosokan permukaan dilakukan pada tempat yang rata agar hasil pengujian tidak terlihat cembung dan tidak terlihat goresan

Saran terhadap operasional *boiler* adalah:



1. Inspeksi tanpa merusak seperti NDT dilakukan pada *tube boiler* untuk mendeteksi *tube boiler* yang rusak sejak dini tanpa harus dilakukan *shutdown* serta menghindari efek kebocoran terhadap *tube* lain.
2. Penggunaan partikel pelindung pada permukaan luar pipa terhadap *tube boiler* pada daerah yang bekerja pada kondisi ekstrem seperti pada sekitar *furnace*.

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 1998. **Steam Generation**. Charlotte : The Babcock & Wilcox Company.
- _____. 2002. **ASM Handbook Vol.9 Metallographic and Microstructure**. Material Park. Ohio : USA. ASM International.
- _____. 2002. **ASM Handbook Vol.11 Failure Analysis and Prevention**. Material Park. Ohio : ASM International.
- _____. 2002. **ASTM A 210/A 210 M Standard Specification for Seamless Medium- Carbon Steel Boiler and Super Heater Tubes**. West Conshohocken : ASTM International.
- _____. 2002. **ASTM E10-10 Standard Test Method For Brinell Hardness Of Metallic Materials**. West Conshohocken : ASTM International.
- _____. 2002. **ASTM E112 Standard Test Method For Determining Average Grain Size**. West Conshohocken : ASTM International.
- _____. 2002. **Corrosion-Fatigue Failures of Riser Tube Bends**. Charlotte : The Babcock & Wilcox Company
- _____. 2013. **Boiler Tube Analysis**. Charlotte : The Babcock & Wilcox Company.
- _____. 2013. **ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section I Part PG**. New York : The American Society of Mechanical Engineers.



- _____. 2013. **ASME Section II Part D Boiler & Pressure Vessel Code Section II Part D**. New York : The American Society of Mechanical Engineers.
- Avner, Sidney H. 1974. **Introduction To Physical Metallurgy**. Singapore : McGraw-Hill Book Co.
- Brooks, C. R dan A. Choudury. 2002. **Failure Analysis of Engineering Materials**. New York : McGraw-Hill.
- Callister, William. 2007. **Material Science and Engineering An Introduction**. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- McIntyre, Keith B. 2002. **A Review of The Common Causes of Boiler Failure in The Sugar Industry**. Cape Town : Alstom Power.
- Nishida, Shin-ichi. 1992. **Failure Analysis in Engineering Application**. Jordan Hill. Oxford : Butterworth-Heinemann Ltd.
- Prakash, Banu. 2013. **Boiler Tube Failure**. New Delhi : Steag O&M Company.
- Schweitzer, Philip A. 2003. **Metallic Materials Physical, Mechanical, and Corrosion Properties**. New York : Marcel Dekker, Inc.
- Teir, Sebastian dan Antto Kulla. 2002 **Steam/Water Circulation Design**. Helsinki : Energy Engineering & Environmental Publication
- Woodruff, E. B., H. B. Lammers, dan T. F. Lammers. 2004. **Steam Plant Operation**. 8th Edition. New York : McGraw-Hill.
-

Biografi Penulis



Penulis yang bernama lengkap Eben Haezer lahir di Jakarta, 13 Juni 1994. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Katolik Ricci 2 pada tahun 2000-2006, SMP Katolik Ricci 2 dari 2006-2009, SMA Kristen Penabur Bintaro Jaya sejak tahun 2009-2012, dan melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknologi Industri, jurusan Teknik Material dan Metalurgi sejak tahun 2012 sampai saat ini dengan nomor registrasi pelajar 2712100130.

Selama kuliah, penulis sudah mengikuti beberapa pelatihan keprofesian yaitu pelatihan dan sertifikasi Non Destructive Training Level 1 yang diselenggarakan PT Radiant Utama Interinsco serta pelatihan dan sertifikasi Corrosion Engineer Level 1 yang diselenggarakan Asosiasi Korosi Indonesia (INDOCOR). Penulis juga memiliki pengalaman organisasi sebagai kepala departemen Hubungan Luar BEM FTI-ITS 2014/2015.

Penulis bertempat tinggal di Tangerang Selatan, Banten. Kontak yang dapat dihubungi melalui email ezer.kindangen@gmail.com.